

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
CONSTRUÇÃO CIVIL – PPGECC

ISABELA CRISTINA DE OLIVEIRA

**ANÁLISES DE DADOS PARA A ELABORAÇÃO DE DIRETRIZES
VISANDO À DETECÇÃO DE SULFETOS E SULFATOS NA
COMPOSIÇÃO DE CCR**

Curitiba
2013

ISABELA CRISTINA DE OLIVEIRA

**ANÁLISES DE DADOS PARA A ELABORAÇÃO DE DIRETRIZES
VISANDO À DETECÇÃO DE SULFETOS E SULFATOS NA
COMPOSIÇÃO DE CCR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Marques Filho

Curitiba

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

ISABELA CRISTINA DE OLIVEIRA

ANÁLISES DE DADOS PARA A ELABORAÇÃO DE DIRETRIZES VISANDO À DETECÇÃO DE SULFETOS E SULFATOS NA COMPOSIÇÃO DE CCR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador - Prof. Dr. José Marques Filho

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR (PPGECC)

Prof. Dr. Kleber Franke Portella

Programa de Pós-Graduação em Mestrado e Doutorado em Engenharia (PIPE)

Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR (PPGECC)

Curitiba, 06 de Agosto de 2013.

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Sandra e Edson,
pelo apoio incondicional.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar presente em todos os momentos, sendo bons ou ruins, proporcionando segurança, conforto e forças para superar os obstáculos que a vida apresenta.

Aos meus pais Sandra e Edson, a quem devo tudo o que tenho e conquistei até hoje. Obrigada pelas palavras de apoio, pelas demonstrações de carinho e, principalmente, por me fazerem querer ser sempre melhor como ser humano. Espero de todo o coração fazê-los orgulhosos em tudo o que eu realizar.

Ao Professor José Marques Filho, pela orientação, amizade e confiança. Agradeço por ter dividido seus conhecimentos comigo e por ter me incentivado a seguir em frente mesmo nos momentos de dificuldade.

À COPEL por ter permitido as compensações de horário para que eu pudesse cumprir os créditos exigidos pelo Programa e pelo incentivo dado aos seus funcionários à busca pelo conhecimento.

Às minhas grandes amigas Adriane, Maria Victória e Rayana, presentes que a vida me deu e que estão sempre presentes, independentemente da distância.

Aos colegas da COPEL, Elizeu, Marcos, Maria Izabel, Bruna, Hudson, Cintia, Luiz, Kironi, Everton e Gabriela por todo apoio dado durante este processo, pelo estímulo, pela disponibilidade e especialmente, pela amizade. Agradeço por terem contribuído direta ou indiretamente para que eu atingisse o meu objetivo.

Ao Professor Kleber Portella, pelas valiosas contribuições a este trabalho e por ter sido sempre tão prestativo.

Ao Professor Marcelo Medeiros, pela seriedade e por mostrar a importância da pesquisa científica.

Ao Lorival, com quem muito aprendi, pela compreensão e pelas palavras de incentivo.

Aos colegas do Programa de Pós Graduação em Engenharia da Construção Civil - PPGECC, com quem dividi as ansiedades e angústias que surgiram ao longo do programa de mestrado.

Aos laboratórios de Furnas e do LACTEC, por terem realizado os ensaios e disponibilizado os resultados para esta pesquisa.

Ao Consórcio Energético Cruzeiro do Sul – CECS, em especial ao engenheiro Sergio Luiz Lamy, aos engenheiros Nicole Hasparyk e Dr. Paulo Monteiro por terem colaborado com este estudo, dando seus pareceres técnicos e fornecendo dados e informações baseados em suas experiências.

Aos doutores Reginaldo e Baracho por terem cuidado da minha saúde, que por vezes se mostrou frágil devido ao desgaste decorrente de tanto estudo.

Ao Douglas Moser da TECHDAM pela disponibilidade para sanar dúvidas e explicar assuntos de seu domínio.

Ao Professor Walton Pacelli por ter disponibilizado materiais que contribuíram para a pesquisa.

Aos engenheiros Luiz Fernando Prates de Oliveira e Roberto Seara pelas discussões sobre o tema e disponibilização de dados e materiais para pesquisa.

Ao engenheiro José Carlos Moro Neto, da empresa J. Malucelli, pelas contribuições que permitiram a realização deste estudo.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

“Para cultivar a sabedoria, é preciso força interior. Sem crescimento interno, é difícil conquistar a autoconfiança e a coragem necessárias. Sem elas, nossa vida se complica. O impossível torna-se possível com a força de vontade.”

Dalai Lama

RESUMO

OLIVEIRA, I. C. Análises de dados para a elaboração de diretrizes visando à detecção de sulfetos e sulfatos na composição de CCR. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC), UFPR, Paraná.

A presença de produtos deletérios na composição do concreto pode levar ao comprometimento da durabilidade da estrutura, se não for detectada inicialmente. Embora a tecnologia de investigação de materiais em laboratório esteja bastante avançada, as normas que preconizam os ensaios são falhas para alguns casos, como para a detecção da presença de sulfetos e sulfatos em agregados para CCR, conforme demonstrado nesse trabalho. Foram realizados ensaios de caracterização dos agregados provenientes de uma pedreira, localizada na região intermediária do rio Tibagi no Paraná, e dos demais insumos do concreto visando efetuar a análise do maciço em questão, quando da sua utilização para confecção de estruturas em CCR. Durante o período de moldagem e ensaios dos corpos-de-prova foi detectada, acidentalmente, a deposição de materiais esbranquiçados no local em estudo, fazendo com que esta pesquisa buscasse determinar a influência destes produtos nas características do CCR. Os resultados obtidos para cimento, água, aditivos e agregados a partir dos ensaios preconizados pelas respectivas normas nacionais e internacionais encontraram-se dentro dos limites estabelecidos. Sendo assim, foram moldados corpos-de-prova para verificar o comportamento do concreto ao ensaio de resistência à compressão. Os corpos-de-prova atingiram uma resistência final considerada satisfatória, no entanto, foi observada a baixa evolução da resistência se comparada aos resultados obtidos em ensaios para a construção de barragens de CCR. Para verificar qual a causa do fenômeno observado, foram moldados 64 corpos-de-prova variando o tipo de água, cimento, agregados e aditivos. Somente os ensaios utilizando corpos-de-prova moldados com outro tipo de agregado mostraram-se relevantes, apresentando um rendimento de 0,12 MPa/kg/m³ contra 0,09 MPa/kg/m³ aos 180 dias dos CP's com o agregado da pedreira em estudo. Visando pesquisar a origem do efeito causado pelos agregados, foram realizados ensaios complementares não previstos por normas, como: determinação do teor total de enxofre, DRX, MEV, FRX e MO. Com estes ensaios foi possível detectar a presença de cristais de etringita tardia em razão da presença de sulfetos e sulfatos no agregado pulverizado. Visto que para a confecção do CCR é utilizada uma quantidade elevada de material pulverulento com o intuito de reduzir o índice de vazios, o agregado pulverizado contaminado passou a apresentar, devido à alta superfície específica dos grãos, maior potencial reativo, resultando na formação de etringita que, devido às características expansivas da reação, retardou o ganho de resistência. Esse fenômeno foi potencializado pelos consumos relativamente baixos de aglomerante quando comparados com concreto convencional. Dados os resultados obtidos neste estudo, destacou-se a importância de complementação das normas vigentes tanto para o que diz respeito aos limites de teores de sulfetos e sulfatos no concreto, como em especial, para o CCR. No trabalho procurou-se, também, fornecer bases que permitam criar diretrizes para o estudo de agregados contendo sulfetos e sulfatos, focado em aplicações do material como componente do CCR.

Palavras-chave: concreto, CCR, durabilidade, etringita, sulfato, sulfeto.

ABSTRACT

OLIVEIRA, I. C. Data analysis for developing guidelines for detection of sulfide products and sulfates in RCC composition. 2013. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC), UFPR, Paraná.

The presence of deleterious products in concrete composition can lead to impairment of the durability of the structure, if not initially detected. Although the technology of materials investigation in the laboratory is very developed, the national and international standards are not efficient in some cases, such as for detecting the presence of sulfides and sulfates in aggregates for roller compacted concrete (RCC). The study performed aggregates characterization tests from a stone quarry, located in the middle part of the river Tibagi basin in Paraná, and of the other materials used in concrete in order to make the analysis in RCC mixes. During the molding and testing periods of the specimens it was detected, accidentally, the deposition of bleached material in the study site. This phenomenon have been studied in this work for RCC properties. The characterization of cement, water, additives and aggregates obtained from tests recommended by national and international standards obtained adequate values. Thus, specimens were molded to check the behavior of the concrete against the compressive resistance test. The specimens achieved a final resistance considered satisfactory, however, it was observed the low strength evolution if compared to the results obtained in assays for RCC dams construction. In order to check the causes of the observed phenomenon, 64 specimens were molded varying water, cement, aggregates and additives. Only tests using specimens molded with another type of aggregate were relevant, with a 180 days strength evolution of 0.12 MPa/kg/m³ compared to 0.09 MPa/kg/m³ of the specimens with the aggregate of the stone quarry in study. Aiming to complete the analysis, new tests have been performed, such as: determination of total sulfur content, XRD, SEM, XRF and OM. With these tests it was possible to detect the presence of delayed ettringite crystals generated by sulfides and sulfates in the powdered aggregate. Since for the making of RCC it is used a high amount of crushed aggregate fins in order to reduce the void ratio, the contaminated aggregate started to show, due to the high specific surface of the grains, higher reactive potential, resulting in the new formation of ettringite that, due to the expansive characteristics of the reaction, slowed the strength evolution. This effect was potentialized by the relatively small cement content in RCC mixes. Because of the results obtained through this study, it was highlighted the importance of complementing the current tests recommended by standards both for what concerns the limits of contents of sulfides and sulfates in concrete and, particularly, for RCC. This work, also, has the purpose to furnish data that allow to create guidelines for the study of aggregates containing sulfides and sulfates, focused on applications of the material as a component of RCC.

Keywords: concrete, RCC, durability, ettringite, sulfate, sulfide.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	25
1.2	OBJETIVOS	26
1.2.1	Objetivo geral.....	26
1.2.2	Objetivos específicos.....	26
1.2.3	Validação dos resultados.....	26
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	ATAQUE POR SULFATOS E SULFETOS NO CONCRETO.....	29
2.2	HISTÓRICO	31
2.3	TIPOS DE SAIS DE SULFATOS	34
2.3.1	Sulfato de Magnésio ($MgSO_4$)	35
2.3.2	Sulfato de Cálcio ($CaSO_4$)	37
2.3.3	Sulfato de Sódio (Na_2SO_4).....	37
2.4	ATAQUE INTERNO POR SULFATOS.....	38
2.4.1	Etringita	39
2.4.2	Formação de etringita tardia.....	42
2.4.3	Fatores que influenciam na formação da etringita tardia.....	46
2.5	SULFETOS	47
2.6	MEDIDAS DE PREVENÇÃO	52
2.7	CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR).....	55
2.7.1	Histórico.....	56
2.7.2	Definição.....	58
2.7.3	CCR com alto teor de finos.....	62

3	DESCRIÇÃO DO CASO – CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO MÉDIA DO RIO TIBAGI	63
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	67
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	67
4.1.1	Aditivo	67
4.1.2	Cimento	68
4.1.3	Água	68
4.1.4	Agregados	68
4.1.5	Dosagem do CCR.....	69
4.2	MATRIZ EXPERIMENTAL	69
4.3	ENSAIOS	71
4.3.1	Difração de Raios X.....	72
4.3.2	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	73
4.3.3	Microscopia Ótica	74
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	75
5.1.1	Aditivos	75
5.1.2	Cimento	76
5.1.3	Água	77
5.1.4	Agregados	78
5.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	85
5.3	VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS NA EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	87
5.3.1	Cimento	87
5.3.2	Água	88
5.3.3	Aditivo.....	89
5.3.4	Agregados	89

5.4	VERIFICAÇÃO DOS TEORES DE SULFETOS E SULFATOS	91
5.4.1	Análise microestrutural do concreto – MEV e DRX	91
5.4.2	Análise do material pulverulento.....	98
5.4.3	Teor total de enxofre.....	100
5.4.4	Análise por MO.....	103
5.5	COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS	104
5.6	COMPARATIVO ENTRE TEORES DE SULFETOS E SULFATOS PARA CCV E CCR	104
5.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
6	CONCLUSÕES	107
7	SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS.....	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ataque por sulfatos na barragem de Fort Peck em Montana (MEHTA; MONTEIRO, 2008)	33
Figura 2 – Detalhe de ataque por sulfatos na barragem de Fort Peck (MEHTA; MONTEIRO, 2008)	33
Figura 3 – Detalhe de cristais de etringita vistos através do MEV. Disponível em < http://www.mindat.org >	39
Figura 4 – MEV de cristais de monossulfato hidratado e etringita (MEHTA; MONTEIRO, 2008)	40
Figura 5 – Esquema representando a pressão gerada pela transformação do monossulfoaluminato em trissulfoaluminato. Adaptado de Taylor, Famy, Scrivener (2001)	43
Figura 6 – Influência da presença de CO ₂ nas reações de hidratação do C ₃ A em cimento Portland. Adaptado de Kuzel (1996)	44
Figura 7 – Diagrama representando as condições para ocorrência de etringita tardia segundo Collepardi. Adaptado de Mehta, Monteiro (2008)	45
Figura 8 – Fluxograma que representa DEF (MELO, 2010)	46
Figura 9 – Vazamento no interior da galeria da barragem do Rio Descoberto (KFFURI, 2003)	48
Figura 10 – Deterioração do concreto a jusante da barragem e na galeria (KFFURI, 2003)	49
Figura 11 – Barragens de CCR concluídas ao final de 1996 e de 2002 (FARIAS, 2006 <i>apud</i> TRABOULSI, 2007)	58
Figura 12 – Sequência de construção com CCR (MEHTA; MONTEIRO, 2008)	61
Figura 13 – Deposição de material pulverulento	64
Figura 14 – Surgência de material esbranquiçado	64
Figura 15 – Talude com presença de sais	65
Figura 16 – Deposição de material pulverulento de cor esbranquiçada	65
Figura 17 – Detalhe do acúmulo de material esbranquiçado no entorno dos agregados	66
Figura 18 – Agregados com presença de material esbranquiçado	66

Figura 19 - Curva granulométrica dos agregados - Limites definidos pela norma ASTM C33 para agregado miúdo e agregado graúdo.....	82
Figura 20 - Gráfico Expansibilidade x Tempo - Ensaio de expansão em barras de argamassa com cimento padrão	84
Figura 21 - Gráfico Expansibilidade x Tempo - Ensaio de expansão em barras de argamassa com cimento CPIV-32	84
Figura 22 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão – CCR 01	85
Figura 23 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão – CCR 02	86
Figura 24 – Corpos de prova rompidos apresentando pontos brancos.....	86
Figura 25 - Comparativo de resistências aos 180 dias entre o cimento CPIV Tipo A (utilizado no CCR em estudo) e o CPIV Tipo B.....	88
Figura 26 - Comparativo de evolução das resistências à compressão dos CP's moldados com água de amassamento padrão (do rio) e CP's moldados com água destilada	88
Figura 27 - Comparativo de evolução das resistências à compressão dos CP's moldados com aditivo e CP's sem aditivo	89
Figura 28 - Comparativo de evolução das resistências à compressão dos CP's moldados com variação do tipo de agregado.....	90
Figura 29 - Comparativo de rendimentos entre CP's com traço deste estudo e CP's com traço similar, utilizando agregados e água de amassamento da PCH Santa Luzia	90
Figura 30 - Material esbranquiçado disperso em toda a amostra.....	91
Figura 31 - Detalhe da interface entre agregado e pasta.....	92
Figura 32 - Detalhe das acículas na pasta em ponto esbranquiçado observado na inspeção visual e gráfico de EDX, com destaque para a presença de enxofre.	93
Figura 33 - Deposições aciculares sobre o agregado	93
Figura 34 - Agregado fragmentado próximo de região com grande concentração de acículas sulfatadas	94
Figura 35 - Região da pasta com agrupamentos aciculares contendo enxofre.....	94
Figura 36 - Regiões com aglomerados de produtos aciculares sobre o agregado ...	95
Figura 37 - Detalhe das acículas presentes nas aglomerações da Figura 33 sugestivo de etringita e/ou taumasita e o respectivo espectro EDS.....	95

Figura 38 - Agregado totalmente fragmentado.....	96
Figura 39 - Interface do agregado com formações aciculares.....	96
Figura 40 - Pulverulência importante na amostra.....	97
Figura 41 - Comparação dos teores de enxofre detectados nas amostras da primeira e da segunda remessa para areia e material pulverulento.....	100
Figura 42 - Proporção entre as formas de enxofre determinadas	101
Figura 43 - Teores de SO ₃	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos principais tipos de sais (SILVA FILHO, 1994)	35
Tabela 2– Características das fases formadas devido à presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e CaSO_4 no sistema	41
Tabela 3– Limite de sulfatos solúveis em agregados (AGUIAR; SELMO, 2004)	53
Tabela 4 – Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos da NBR 12655:2006	54
Tabela 5 – Especificações técnicas de materiais para CCR (ANDRIOLO; KREMPEL, 1996)	59
Tabela 6 – Traços de CCR 01 e CCR 02	69
Tabela 7 – Quantidade de CP's moldados para realização de ensaio de resistência à compressão	70
Tabela 8 – Quantidade de CP's moldados para verificação dos resultados obtidos pelos ensaios comparativos	70
Tabela 9 – Ensaio acreditado pela Cgere/Inmetro realizados	71
Tabela 10 – Ensaio não acreditado pela Cgere/Inmetro realizados	71
Tabela 11 – Resultados dos ensaios químicos dos aditivos	75
Tabela 12 – Resultados dos ensaios físicos mecânicos do cimento	76
Tabela 13 – Resultados dos ensaios químicos do cimento	76
Tabela 14 - Análise física da água	77
Tabela 15 - Análise química da água	78
Tabela 16 - Ensaio de caracterização de agregados - Areia artificial	78
Tabela 17 - Ensaio de caracterização de agregados – Brita 9,5 mm	79
Tabela 18 - Ensaio de caracterização de agregados – Brita 25 mm	80
Tabela 19 - Ensaio de caracterização de agregados – Brita 50 mm	81
Tabela 20 - Análise petrográfica do diabásio	83
Tabela 21 - Determinação da expansão em barras de argamassa utilizando cimento padrão e cimento CPIV-32	83
Tabela 22 - Comparativo de rendimento médio entre os dados deste estudo e de obras em CCR em outras regiões.	87

Tabela 23 – Compostos mineralógicos identificados por DRX.....	98
Tabela 24 - Verificação dos teores de cloretos, sais e sulfatos na areia artificial e no material pulverulento	99
Tabela 25 - Teor total de sulfatos solúveis no concreto em estudo.....	99
Tabela 26 - Teor de enxofre sob a forma de sulfetos e sulfatos na areia artificial e no material pulverulento	100
Tabela 27 - Teores de SO ₃ sob a forma de sulfetos e sulfatos e fases por difração de raios X	102
Tabela 28 - Sulfetos presentes nas amostras analisadas por microscopia ótica de luz refletida e seu grau de alteração	103
Tabela 29 – Comparativo entre teores de enxofre obtidos através dos ensaios e os limites de norma	104
Tabela 30 – Comparativo das características do CCR e do CCV	105

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a/c	Relação água/cimento, em massa
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ARI	Alta resistência inicial
ASTM	American Society for Testing and Materials
C ₃ A	Aluminato Tricálcico
C ₃ S	Silicato Tricálcico
CCR	Concreto Compactado com Rolo
CCRATF	Concreto Compactado com Rolo com Alto Teor de Finos
COPEL	Companhia Paranaense de Energia S.A.
CP	Corpo-de-prova
CP's	Corpos-de-prova
DEF	Formação de etringita tardia
D _{máx}	Dimensão máxima característica do agregado
DRX	Difração de raios X
EDS	Espectroscopia de difração de raios X
f _{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
FRX	Espectrometria de fluorescência de raios X
FURNAS	Furnas Centrais Hidrelétricas S.A.
IBRACON	Instituto Brasileiro de Concreto
ICOLD	International Commission on Large Dams
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
LACTEC	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
NBR NM	Norma MERCOSUL

RAA	Reação álcali-agregado
RAS	Reação álcali-sílica
SO ₃	Trióxido de enxofre
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UHE	Usina Hidrelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

ELEMENTOS QUÍMICOS

Al	Alumínio
Au	Ouro
Ca	Cálcio
Cl	Cloro
Fe	Ferro
H	Hidrogênio
K	Potássio
Na	Sódio
O	Oxigênio
S	Enxofre

LISTA DE SÍMBOLOS

NOTAÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO

A	Óxido de alumínio (Al_2O_3)
AF_m	Fase $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ – mono. Designação dada aos produtos de hidratação, envolvendo os aluminatos e/ou ferritas e/ou sulfatos. Refere-se a 1 (mono) unidade de CX, onde X diz respeito a um ânion, com destaque para OH^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} .
AF_t	Diferente da fase mono, “t” representa três unidades de CX. As fases AF_t têm estrutura cristalina acicular, sendo a etringita o exemplo mais conhecido.
C	Óxido de cálcio (CaO)
CaCO_3	Carbonato de cálcio (calcita)
C_3A	Aluminato tricálcico
C_3S	Silicato tricálcico
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico
CaSO_4	Sulfato de cálcio anidro
CH	Hidróxido de cálcio (portlandita)
CSH	Silicato de cálcio hidratado (tobermorita)
F	Óxido de ferro (Fe_2O_3)
K	Óxido de potássio (K_2O)
M	Óxido de magnésio (MgO)
N	Óxido de sódio (Na_2O)
Na_2SO_4	Sulfato de sódio
S	Dióxido de silício (SiO_2)

1 INTRODUÇÃO

Com o aperfeiçoamento das técnicas de produção e custo relativamente baixo dos materiais aplicados, o concreto tem sido utilizado em larga escala na construção civil, sendo o cimento um dos materiais mais consumidos do planeta.

O concreto proporciona resistência, versatilidade e durabilidade às estruturas, mas, para isso, é necessário que a execução seja feita de maneira correta, o que envolve desde a etapa de projeto até a manutenção e proteção contra agentes agressivos.

Estruturas de concreto podem apresentar manifestações patológicas em razão do tempo e/ou do ambiente em que se encontram. Estes problemas envolvem processos químicos e físicos que resultam em fissuras, eflorescências, trincas, lixiviação, entre outros (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O caso de barragens de concreto compactado com rolo (CCR) não é diferente, pois falhas durante a construção ou então incompatibilidade dos insumos utilizados com o meio ambiente podem levar a vários dos sintomas citados.

Para que o concreto possa ser utilizado em ambientes agressivos, é imprescindível que se conheçam as causas da deterioração da estrutura, bem como os meios de intervenção que venham a garantir sua vida útil. O desconhecimento das causas e dos mecanismos responsáveis pelos indícios apresentados por uma estrutura pode levar a consequências graves como até mesmo a sua ruína.

Para se detectar que uma estrutura encontra-se sob ação deletéria de agentes agressivos, é recomendável a observação e a análise de suas manifestações patológicas. Manifestações essas que estão, em sua maioria, relacionadas à presença de água associada aos elementos químicos presentes na sua composição e no ambiente (SILVA FILHO, 1994; REGATTIERI; HELENE, 1999; PAVOINE *et. al.*, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Numa estrutura sujeita a algum tipo de ataque químico, as reações tenderão a persistir até que haja um equilíbrio termodinâmico da reação ou cessem os reagentes. Dessa forma, pode-se dizer que a ação de agentes deletérios ao

concreto deve ser diagnosticada o quanto antes para que possa ser feita a análise da situação e a previsão do que deve ser feito para a mitigação de seus efeitos.

Uma das causas que afetam a durabilidade de uma estrutura de concreto é o ataque por sulfatos que, como consequência, gera aumento de volume, desagregação e lixiviação, com consequente perda de massa (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O ataque por sulfatos, tanto interno quanto externo, gera tensões internas no concreto devido à formação de cristais no interior dos poros (SILVA FILHO, 1994; COSTA, 2004; COLLEPARDI, 2003).

Muitos casos de estruturas de concreto sob ataque por sulfatos foram relatados, alguns resultando em descomissionamento das mesmas e manutenções precoces (SKALNY *et. al.*, 2001; MEHTA; MONTEIRO, 2008). No entanto, ainda se tem dúvida com relação aos mecanismos da reação e ao seu potencial deletério.

Para evitar que a estrutura apresente riscos de degradação devido ao ataque por sulfatos, é necessário que se compreenda como estes produtos agem e qual a melhor forma de monitoramento e análise dos sintomas apresentados.

Em grandes estruturas, a degradação pode ocorrer de forma intensificada, devido ao maior volume de concreto exposto aos agentes agressivos e, no caso de barragens, à pressão hidráulica envolvida.

Na matriz hidrelétrica brasileira existem mais de 50 barragens de CCR e, de acordo com a bibliografia, a utilização deste tipo de solução tem se intensificado ao longo do tempo (ICOLD).

Nestas barragens, o volume de concreto é grande e sua dosagem é realizada conforme as recomendações das normas vigentes e análises preliminares do ambiente e dos insumos. No entanto, muitas vezes não é possível prever o comportamento das estruturas devido à heterogeneidade dos meios em que são construídas e pelas variáveis ambientais envolvidas. Assim, quando controlada a estrutura por meio de instrumentos ou até mesmo visualmente, podem-se verificar alterações no seu desempenho com o passar do tempo.

Segundo a lei 12.334, de 20 de setembro de 2010, referente à política nacional de segurança de barragens, é necessário garantir as condições que visem manter a integridade estrutural e operacional destas estruturas.

Como dito anteriormente, em obras de grande porte como barragens vem sendo utilizado o CCR, já que a sua aplicação permite uma diminuição de custos e tempo de construção. Na intenção de reduzir os vazios e o consumo de clínquer normalmente utiliza-se uma grande quantidade de pozolana na dosagem, mas, como no Brasil a disponibilidade de cinza volante é limitada, emprega-se agregado pulverizado. O concreto desenvolvido com as características descritas é conhecido usualmente como CCR com alto teor de finos (CCRATF). No CCRATF, utiliza-se em torno de 160 kg/m^3 de pó-de-pedra, que potencializa o efeito de reações deletérias pela expressiva superfície específica (MARQUES FILHO, 2005).

No CCR, a quantidade de cimento utilizada é inferior à do concreto convencional, no entanto sua porosidade é baixa, o que pode propiciar o surgimento de trincas ou fissuras quando sujeito a reações expansivas. A quantidade relativamente pequena de clínquer, comparativamente aos concretos convencionais, faz com que pequenos teores totais de sulfatos e sulfetos possam ser potencialmente mais prejudiciais no CCR.

As expansões volumétricas causadas pelos produtos destas reações, que podem chegar a mais de duas vezes o volume original, normalmente resultam na perda de resistência da estrutura e, conseqüentemente, na deterioração progressiva, reduzindo sua vida útil (SILVA FILHO, 1994).

Para avaliar a utilização de pedreiras localizadas na região mediana do rio Tibagi, no Estado do Paraná, como possíveis fontes de agregados a serem adotados na confecção de CCR, foram moldados corpos de prova e realizados ensaios de caracterização física, química e mecânica. Durante o período de realização dos ensaios, foram detectados, acidentalmente, sinais de presença de material contendo enxofre na superfície da região em estudo. Como esta região apresenta um potencial hidráulico considerável, poderá vir a receber a implantação de usinas hidrelétricas. Sendo assim, a construção de barragens em CCR pode ser realizada nas proximidades do local em questão e, por questões de viabilidade

econômica como também de logística, é importante avaliar a utilização do material similar ao das pedreiras observadas.

Este estudo teve por objetivo a análise do efeito da utilização de materiais provenientes dos taludes rochosos com presença de sulfato no desempenho de estruturas quando utilizados para a confecção de concreto.

Neste trabalho, foram propostas análises e ensaios para a detecção e quantificação de sulfatos e sulfetos presentes nas rochas ígneas da região média do rio Tibagi, comparando os resultados com as exigências das respectivas normas brasileiras.

Determinados os sais e compostos com enxofre, foram analisados seus efeitos em corpos de prova de concreto moldados, procurando gerar um processo de monitoramento de estruturas de CCR que venham a utilizar os agregados com as intrusões de material potencialmente deletério.

O processo de monitoramento inclui a determinação do total de materiais contendo enxofre nos agregados e no concreto, criando possibilidades de mudança das normas existentes ou seu comportamento.

1.1 Problema de pesquisa

A questão que motivou esta pesquisa foi: “É possível caracterizar adequadamente os agregados obtidos a partir de rochas ígneas com intrusão de produtos com enxofre quando utilizados para a fabricação de CCR, que possui alto teor de pó de pedra?”.

Dessa forma, foram avaliados métodos de análise para a caracterização dos materiais com relação à presença de sulfatos e sulfetos para, a partir dos resultados obtidos nos ensaios, determinar se é factível criar um processo de monitoramento eficaz de estruturas que utilizem agregados com intrusão deste tipo de agente deletério.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Verificar meios de determinação do teor de sulfatos e sulfetos em rochas ígneas junto a bacias sedimentares antigas quando da utilização de agregados provenientes deste tipo de rocha em CCR, com a abordagem de dosagem utilizando alto teor de finos de agregado, comparando os resultados obtidos com os limites estabelecidos pelas normas referentes ao assunto.

1.2.2 Objetivos específicos

- Propor a aplicação de técnicas avançadas para determinação do teor de sulfatos e sulfetos em agregados de rochas ígneas com intrusão de produtos com enxofre e em CCR utilizando estes agregados;
- Relatar um caso inédito onde sulfatos e sulfetos podem coexistir com rochas ígneas, e a limitação dos ensaios preconizados nas normas nacionais e internacionais, principalmente quando este material for aplicado ao CCRATF;
- Propiciar uma análise crítica com relação à utilização das normas como referência para casos específicos como este;
- Estabelecer uma correlação entre os ensaios executados e os parâmetros mecânicos apresentados pelo CCR;
- Estabelecer correlações entre resultados baseados nas normas vigentes e os resultados obtidos a partir de ensaios mais sofisticados não regulamentados.

1.2.3 Validação dos resultados

Haja vista que há pouca bibliografia em se tratando do tema proposto por este trabalho, os dados disponíveis são escassos dificultando sua comparação para posterior análise. Sendo assim, foram utilizados diversos métodos de análise por diferentes laboratórios reconhecidos, visando à validação dos resultados. Os ensaios realizados são consagrados e permitem sua repetibilidade para comparação.

1.3 Estrutura da dissertação

A estrutura do trabalho consiste nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1 – Introdução
- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica:
 - Ataque por sulfatos e sulfetos no concreto - Apresentação do conceito do ataque por sulfatos e sulfetos no concreto, os tipos mais comuns de sais de sulfato, ataque interno por sulfatos (DEF – Delayed Ettringite Formation), ataque externo por sulfatos, mecanismos de reação, ensaios e normas que regem este tema.
 - Concreto compactado com rolo - Revisão do conceito do CCR, barragens construídas com esta tecnologia, histórico e tendências.
- Capítulo 3 – Estudo de caso - Caracterização do entorno da região média do rio Tibagi com descrição das condições do agregado e dos taludes verificados.
- Capítulo 4 – Programa experimental - Apresentação dos métodos e ensaios realizados para caracterizar os insumos utilizados no estudo bem como a matriz experimental utilizada.
- Capítulo 5 – Resultados e discussões - Apresentação dos resultados dos ensaios realizados.
- Capítulo 6 – Conclusões - Resumo dos resultados obtidos, ressaltando os aspectos mais relevantes e os fatores de maior influência no estudo.

- Capítulo 7 – Sugestões para novas pesquisas - Apresentação de sugestões para trabalho futuros na mesma linha de pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ataque por sulfatos e sulfetos no concreto

Manifestações patológicas no concreto estão, em sua maioria, diretamente relacionadas à presença de umidade associada aos elementos químicos presentes na sua composição e no ambiente. Esta combinação pode gerar interações químicas cujos produtos de reação afetam a durabilidade da estrutura (SILVA FILHO, 1994; PAVOINE *et. al.*, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Quando o concreto encontra-se no estado fresco, necessita da presença de água para que ocorram as reações de hidratação que resultam no ganho de resistência da estrutura. Já no estado endurecido, a água pode exercer o papel de meio de transporte de substâncias deletérias para o interior do concreto, levando a diversos processos de deterioração (SILVA FILHO, 1994).

Não só a permeabilidade da pasta como também a do agregado podem influenciar na durabilidade do concreto. Em alguns casos, o agregado pode apresentar microfissuras e permeabilidade significativa, assim como pode conter substâncias nocivas.

O concreto deteriora-se devido a diversos fatores sejam eles químicos ou físicos. Como fenômenos físicos destacam-se: abrasão, erosão, cavitação, cristalização de sais nos poros, congelamento da água e ação do fogo. Os fenômenos químicos normalmente ocorrem quando agentes deletérios presentes no ambiente penetram na pasta e dão início às reações químicas que podem vir a comprometer a estrutura. Exemplos destes fenômenos químicos são: hidrólise dos componentes da pasta e reações formadoras de produtos expansivos a partir de ataque por sulfatos, reações álcali-agregado, corrosão nas armaduras do concreto, entre outras (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A ação de quantidades excessivas de sulfatos internos ou externos ao concreto é denominada “ataque por sulfatos”. A partir de diferentes processos, o ataque por sulfatos pode levar o concreto à expansão, fissuração e até decomposição dos principais produtos de hidratação do cimento. Quando o sulfato

reage com a pasta de cimento, dá origem a produtos de valor cimentício baixo, reduzindo a resistência do concreto.

Como resultado do ataque por sulfatos tem-se a formação de etringita ($\text{Ca}_6\text{A}_{12}(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) e/ou gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Esses minerais são formados a partir das interações entre a água agressiva contendo sulfatos e os produtos da hidratação do cimento como o monossulfato hidratado e o hidróxido de cálcio (ACI 201.2R-92, 1997; SILVA FILHO, 1994; BRE SPECIAL DIGEST 1, 2001; TAYLOR, 1997; MEHTA, MONTEIRO, 2008; SILVA, HASPARYK, CASAREK, 2011).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o ataque por sulfatos no concreto pode manifestar-se de duas maneiras: expansão e fissuração ou diminuição progressiva de resistência e perda de massa. A primeira forma de manifestação deve-se ao fato de que, ao penetrar no concreto, os íons sulfato combinam-se com os compostos hidratados do cimento resultando em reações expansivas que causam fissuração. Quando o concreto fissura, tem a sua permeabilidade aumentada, o que facilita a penetração da água agressiva, acelerando o processo de deterioração. Já a perda progressiva de resistência e de massa deve-se à perda de coesão dos produtos de hidratação do cimento. O processo de degradação predominante dependerá da fonte e do teor de íons sulfato e da composição da pasta de cimento.

Quando o ataque for externo, os íons sulfato encontrados em ambientes tanto industriais como naturais podem ser levados para o interior do concreto. Tais íons são provenientes de decomposição de matéria orgânica, chuvas ácidas, água do mar, esgotos domésticos e industriais, combustões, emissões de energia termelétrica, solos agrícolas, águas freáticas, entre outros (LINHARES; 2010).

De acordo com Costa (2004), o desenvolvimento das reações e o mecanismo de deterioração podem variar de acordo com a situação. Quando se processa para o interior do concreto, a composição da solução dos poros pode mudar e alterar a progressão das reações. O autor menciona ainda que, normalmente, a deterioração do concreto pelo ataque de sulfatos é proveniente da decomposição química de determinados produtos de hidratação do cimento após o seu endurecimento e formação de produtos expansivos, cujo efeito provoca tensões superficiais possibilitando o colapso da estrutura.

Quando os íons sulfato são provenientes da matriz cimentícia ou dos agregados utilizados para a confecção do concreto, pode ocorrer o ataque interno por sulfatos, resultando na formação de etringita tardia (MELO, 2010).

Ainda, a utilização de agregados contaminados com sulfetos também pode desencadear o ataque interno por sulfatos pois, segundo Neville (1997), em determinadas condições os sulfetos podem oxidar-se originando os sulfatos. Esta reação gera produtos de maior volume, resultando em expansão e, consequentemente, fissuração da estrutura.

Sendo assim, devido à disponibilidade dos íons sulfato no ambiente e à presença de sulfetos em determinados tipos de rocha, as estruturas estão suscetíveis a ações deletérias e por isso é necessária a compreensão dos tipos de reação, fatores que influenciam bem como medidas de prevenção conforme será visto adiante.

2.2 Histórico

A qualidade do concreto é a melhor proteção contra o ataque por sulfatos, no entanto, falhas de execução, projeto ou então submissão da estrutura a um ambiente agressivo podem tornar o concreto vulnerável às ações deletérias dos íons SO_4^{2-} , como mostrado na bibliografia disponível.

Em Magdeburg, na Alemanha, houve um caso de ataque por sulfato nos pilares da ponte do rio Elbe devido à contaminação da água. De acordo com Biczok (1967 *apud* Mehta e Monteiro, 2008), a água da fonte continha 2.040 mg/L de SO_4^{2-} . Em 4 anos, ocorreu expansão significativa do concreto causando fissuração tornando necessárias a demolição e reconstrução da estrutura.

Outro caso significativo de deterioração pela ação dos sulfatos ocorreu nas vigas de concreto pré-moldado e nas de concreto moldadas in loco no Candlestick Park Stadium na Califórnia (EUA). O graute utilizado não teve compactação adequada durante a execução, então houve perda de resistência devido a lixiviação do material cimentício e formação de estalactites de carbonato de cálcio ao redor da estrutura. Análises por difração de raio-X indicaram a presença de etringita e gipsita apontando para ataque de sulfatos. Pelo fato de as juntas de graute localizarem-se

entre 18 e 30 m acima do nível do solo e de a drenagem do local ser insuficiente, houve acúmulo de água da chuva no entorno da argamassa. É possível que tenha havido o desenvolvimento de reações entre a água acumulada e a poluição do ar, resultando na chuva ácida, que é um agente deletério tanto para as argamassas quanto para os concretos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ainda, na Califórnia, foram detectados problemas em áreas residenciais envolvendo a presença de sulfatos. Possíveis problemas de execução associados à presença de sulfatos no solo levaram a deterioração prematura de estruturas relevantes como piso de garagens, lajes, fundações, entre outras. Há alguns anos, já se sabia que a região sul da Califórnia era composta por solos contendo altos teores de sulfato, normalmente na forma de gesso. De acordo com o histórico geológico, esta região de formações de leitos marinhos com grandes depósitos salinos, apresentou diferentes concentrações de sulfatos em sua extensão. Sendo assim, em 1970, o Comitê Técnico da Indústria de Cimento da Califórnia propôs um documento chamado “Práticas recomendadas para minimizar o ataque no concreto por sulfatos provenientes da água e do solo” (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2001).

Na barragem de *Fort Peck* em Montana (EUA), foi detectada a ocorrência de ataque por sulfato de cálcio, em 1971. Neste caso, houve perda de massa e redução de resistência nas áreas afetadas. A profundidade da região afetada na parede de descarga de água aumentou para cerca de 200 mm, como é possível visualizar na Figura 1 e na Figura 2. A concentração de sulfatos da água subterrânea era de 10.000 mg/L. Uma investigação das amostras indicou grandes quantidades de gipsita formada devido à combinação com os componentes da pasta de cimento hidratada. Consequentemente, o concreto da estrutura tornou-se poroso e passou a desintegrar-se facilmente (MEHTA; MONTEIRO, 2008).



Figura 1 – Ataque por sulfatos na barragem de Fort Peck em Montana (MEHTA; MONTEIRO, 2008)



Figura 2 – Detalhe de ataque por sulfatos na barragem de Fort Peck (MEHTA; MONTEIRO, 2008)

Segundo Silva Filho (1994), as primeiras experiências de imersão de corpos de prova em soluções com sulfatos indicaram que o componente C_3A (aluminato tricálcico) do cimento apresentava correlação com a deterioração provocada. Esta correlação ficou evidente também num programa de testes realizados durante a construção de um aqueduto no Rio Colorado (EUA). Para justificar esta constatação

foi dito que, quando da ocorrência de uma reação entre os íons sulfato e os aluminatos componentes do cimento, há a produção de etringita, acarretando em aumento de volume, tensionamento da matriz e, conseqüentemente, expansão que dará início a fissuração (TUTHILL; 1988, *apud* SILVA FILHO; 1994).

Melo *et al.* (2010), citam dormentes de ferrovias da Suécia, vigas em concreto protendido e elementos de grande seção com alto consumo de cimento, sem cura térmica no Reino Unido e os pilares de ponte na América do Norte também sem tratamento térmico nas primeiras idades como casos de deterioração em estruturas de concreto atribuídos à etringita tardia, DEF.

2.3 Tipos de sais de sulfatos

Os sais de sulfatos podem ser facilmente encontrados em diversas regiões do mundo, normalmente em áreas planas, onde os sais que não foram carregados pelo fluxo de água foram acumulando-se. Nesses casos, é comum a deposição de uma camada esbranquiçada na superfície, indicando a presença do problema (SILVA FILHO, 1994).

Os íons SO_4^{2-} estão também presentes na água do mar em quantidades suficientes para desencadear o processo deletério ao concreto. Conforme o ataque acontece, a permeabilidade do concreto aumenta, tornando a estrutura mais suscetível à degradação tanto por causas físicas quanto químicas. As condições de exposição do concreto indicam a severidade do ataque. Na zona de maré, por exemplo, onde ocorrem oscilações de nível, os sais sofrem cristalização cíclica nos poros, resultando em expansões que farão com que fissuras passem a surgir, possibilitando o agravamento das condições da estrutura (SILVA FILHO, 1994; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

São muitos os tipos de sais, dentre eles, os mais conhecidos estão citados na Tabela 1, onde estão descritos o tipo de cátion, cor, solubilidade origem e grau de agressividade de cada tipo de sal.

Tabela 1 – Características dos principais tipos de sais (SILVA FILHO, 1994)

Tipo	Cátion	Cor	Solubilidade	Origem	Agressividade
K ₂ SO ₄	Potássio	Branca	Baixa	Água do mar/ subterrânea	Elevada
NH ₄ SO ₄	Amônia	Branca	Alta	Fábricas de explosivos/ coque/ indústrias químicas/ águas subterrâneas	Elevada
Na ₂ SO ₄	Sódio	Branca	Alta	Indústrias químicas/ leite do mar/ água do mar	Elevada
CaSO ₄	Cálcio	Branca	Baixa	Águas subterrâneas/ escória de carbono	Elevada
MgSO ₄	Magnésio	Branca	Alta	Água do mar/ subterrânea	Elevada
CuSO ₄	Cobre	Branca	Alta	Conservação de madeiras/ galvanotecnia	Elevada
FeSO ₄ / Fe ₂ (SO) ₄	Ferro	Verde/ branca	Alta	Desinfetantes/ tinturarias/ tratamento de água	Elevada
ZnSO ₄	Zinco	Branca	Baixa	Indústrias químicas/ tinturarias	Média
KAlSO ₄	Potássio/ Alumínio	Branca	Baixa	Indústrias químicas	Média
PbSO ₄	Chumbo	Branca	Muito baixa	Indústrias químicas	Reduzida
CoSO ₄	Cobalto	Vermelha	Baixa	-	Reduzida
NiSO ₄	Níquel	Verde	Baixa	Indústrias químicas	Reduzida

O tipo de cátion do sal é um fator de grande importância, pois sua presença determina a existência de certas reações, principalmente uma troca catiônica com o Ca(OH)₂, que pode causar o aparecimento de hidróxidos com solubilidade variável. Os sulfatos de sódio, magnésio e cálcio são os mais destacados, pela agressividade e abundância (NEVILLE, 1997; COSTA, 2004; SOUZA; JOHN, 2007).

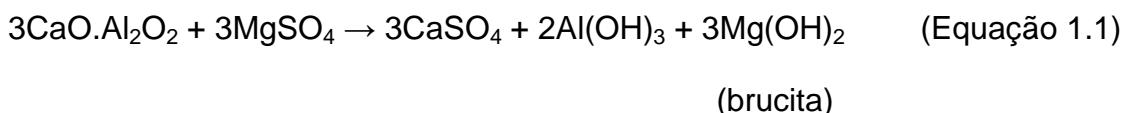
Segundo Souza e John (2007), as soluções de sulfato de magnésio são mais agressivas que as de sódio, por exemplo, para a mesma concentração pois no ataque por Na₂SO₄, a reação com a pasta de cimento ocorre com os íons SO_4^{2-} enquanto que no ataque por MgSO₄, o cátion Mg^{2+} também participa da ação agressiva.

2.3.1 Sulfato de Magnésio (MgSO₄)

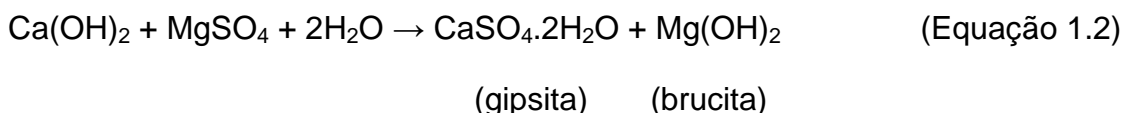
O ataque por sulfato de magnésio, também conhecido como “Sal Amargo”, ocorre nas fases do silicato de cálcio hidratado e portlandita, formando sulfoaluminato de cálcio, aluminato de cálcio hidratado, hidróxido de magnésio e gesso. A reação forma sais solúveis de cálcio que podem ser lixiviados. Na presença do sulfato de magnésio, a etringita torna-se instável, podendo reagir, formando

gesso. Desta forma, a consequência crítica deste tipo de ataque é a destruição do C-S-H, com a descalcificação, afetando as propriedades mecânicas da pasta (NEVILLE, 1997), o que pode ser verificado nas reações indicadas nas Equações 1.1 a 1.3.

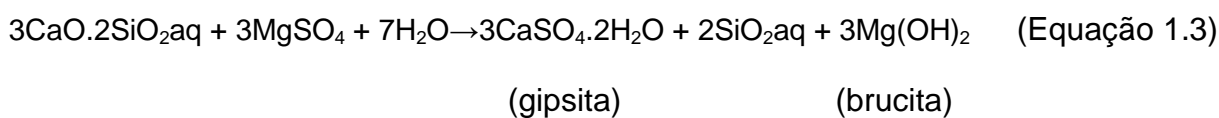
Ataque ao C₃A:



Ataque ao Ca(OH)₂:



Ataque ao C-S-H:



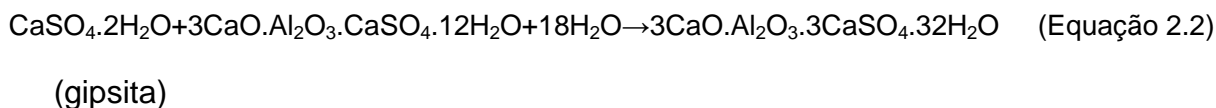
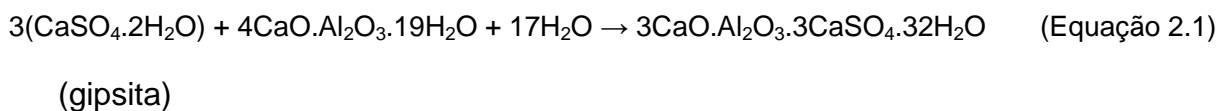
Sendo um dos sais mais nocivos ao concreto, o sulfato de magnésio é cerca de duas vezes mais solúvel que o de sódio e trinta e cinco vezes mais que o de cálcio (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Silva Filho (1994), o mineral formado denominado brucita é praticamente insolúvel em água, sendo assim, pode se depositar nos poros do concreto ou na superfície da estrutura, dificultando a difusão dos íons, assim retardando a velocidade da reação. No entanto, segundo Lawrence (1990, *apud* SILVA FILHO, 1994), a formação da película de brucita pode, também, aumentar a concentração de íons sulfato no interior da estrutura, acelerando a reação deletéria.

Devido à possibilidade de ataque aos silicatos, mesmo os cimentos resistentes aos sulfatos não estão livres dos efeitos deletérios causados pela exposição ao sulfato de magnésio (SILVA FILHO, 1994).

2.3.2 Sulfato de Cálcio (CaSO₄)

O sulfato de cálcio pode ser apresentado, principalmente, de duas formas: de natureza anidra (CaSO₄) ou hidratada, também conhecido como gesso (CaSO₄.2H₂O). Apresenta baixa solubilidade se comparado aos sulfatos de magnésio e sódio (máximo 0,2%). Ao atacar o aluminato de cálcio hidratado, forma o sulfoaluminato de cálcio, também conhecido como etringita, cujo volume é 2,5 vezes maior que o do C₃A. A reação ocorre quando a concentração do sulfato estiver em torno de 2 g de CaSO₄/l de água (SILVA FILHO, 1994; COSTA, 2004; MEHTA, MONTEIRO, 2008). As possíveis reações estão demonstradas nas Equações 2.1 e 2.2.



Segundo Silva Filho (1994, p.64):

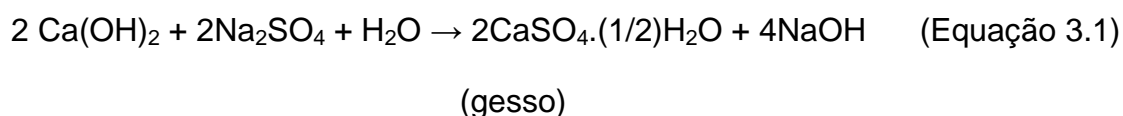
“Na realidade, uma parcela de sulfato de cálcio já é incorporada ao clínquer durante o processo de fabricação do cimento, para regular a pega. Porém, durante a hidratação, as condições químicas da solução resultante da dissolução dos compostos anidros são tais que ocorre a formação de monossulfato hidratado de cálcio, ao invés de trissulfato. Como a estrutura resistente ainda não se desenvolveu completamente, o monossulfato pode se cristalizar sem provocar o aparecimento de tensões. Mais tarde, durante a exposição do concreto endurecido à solução externa contaminada com sulfatos, o monossulfato pode se dissolver e recrystalizar sobre a forma de trissulfato, o que acarreta um aumento de volume dentro da estrutura já enrijecida.”

2.3.3 Sulfato de Sódio (Na₂SO₄)

Ataque do tipo ácido que consiste na conversão do hidróxido de cálcio em gesso. Conversão esta que representa um aumento em, aproximadamente, 100% do volume dos sólidos componentes da pasta. O gesso formado pode combinar-se com o aluminato tricálcico (C₃A), formando o trissulfoaluminato (etringita), que, como

foi visto anteriormente, resulta numa reação de caráter expansivo. Então, basicamente, este ataque é oriundo de duas reações principais: a reação entre o Na_2SO_4 e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formando gipsita e a reação entre a gipsita e os aluminatos, formando a etringita (SILVA FILHO, 1994; COSTA, 2004; MEHTA, MONTEIRO, 2008).

A estabilidade do C-S-H é assegurada pela manutenção da alta alcalinidade do sistema, que é resultado da formação de hidróxido de sódio como subproduto da reação, dada por:



Costa (2004) afirma que, quando em concentrações inferiores a 1 g SO_4/l de água, a reação com sulfato de sódio caracteriza-se pela produção de etringita e subsequentemente pela deterioração causada pelo ataque à fase do aluminato de cálcio hidratado. Já em elevadas concentrações, o sulfato de sódio passa a reagir com o hidróxido de sódio, resultando num aumento de volume, entretanto, ainda não se sabe ao certo se esta expansão é danosa ou não à estrutura de concreto.

O ataque externo por sulfatos deve-se então, resumidamente aos seguintes fatores:

- a) teor e natureza do sulfato presente;
- b) nível da água e sua variação sazonal;
- c) fluxo da água subterrânea e porosidade do solo;
- d) forma geométrica da estrutura;
- e) qualidade do concreto; e
- f) tipo de cimento utilizado.

2.4 Ataque interno por sulfatos

O ataque interno por sulfatos ocorre, como o próprio nome indica, quando os íons sulfato são provenientes dos produtos que compõem o concreto (agregados

contaminados com gipsita ou cimentos com altos teores de sulfatos, por exemplo) e não do meio externo em que a estrutura se encontra (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.4.1 Etringita

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a etringita, representada na Figura 3, é normalmente o primeiro produto a cristalizar-se durante a primeira hora de hidratação do cimento à temperatura ambiente. A formação da etringita primária (etringita propriamente dita) contribui para o enrijecimento, pega e desenvolvimento da resistência inicial da pasta.

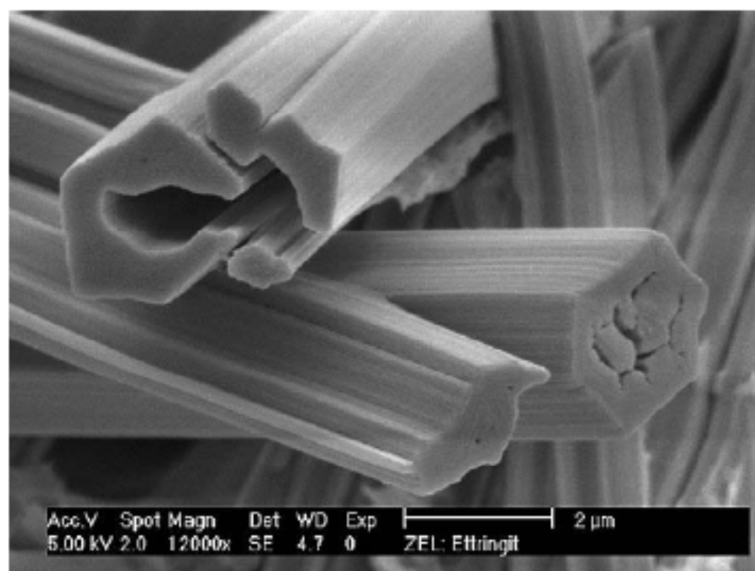


Figura 3 – Detalhe de cristais de etringita vistos através do MEV. Disponível em <<http://www.mindat.org>>

A etringita primária é um sulfoaluminato cálcico hidratado cristalino, cuja fórmula é $C_6A\bar{S}_3H_{32}$, produto da hidratação do cimento Portland. Sua formação é consequência das reações entre os aluminatos e ferritas cálcicos anidros presentes no clínquer e os sulfatos que, geralmente em forma de gesso, misturam-se para produzir o cimento (AGUIAR, 2004; MELO, 2010).

Segundo Aguiar (2004), em compostos de cimento puros, em função da concentração do C_3A e dos íons sulfato na solução, forma-se o produto cristalino trissulfoaluminato de cálcio (AFt), também conhecido por etringita, ou o

monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm). Na Figura 4, é possível identificar as estruturas cristalinas tanto de monossulfatos hidratados como também de etringita.

A relação sulfato/alumina da solução pode favorecer a formação de $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ (trissulfato hidratado), que forma cristais prismáticos. Na fase aquosa durante a primeira hora, esta relação $SO_4^{2-}/Al(OH)_4$ é alta. Conforme as características da solução se alteram com o passar do tempo, a solubilidade dos aluminatos aumenta. Eventualmente, nas pastas de cimento puro, a etringita se transforma em monossulfato hidratado ($C_4A\bar{S}H_{18}$), que forma cristais hexagonais, a partir da decomposição da etringita quando todo o sulfato de cálcio for consumido (MEHTA; MONTEIRO, 2008; MELO, 2010). Se o sulfato volta a ficar disponível, a etringita torna a formar-se.

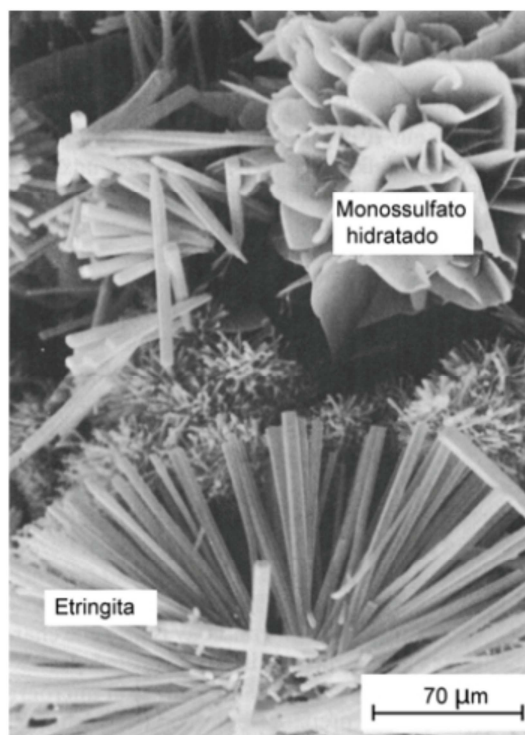


Figura 4 – MEV de cristais de monossulfato hidratado e etringita (MEHTA; MONTEIRO, 2008)

As características importantes das fases monossulfoaluminato e trissulfoaluminato (etringita), segundo Maia (2008), estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2– Características das fases formadas devido à presença de Ca(OH)_2 e CaSO_4 no sistema

Fase	Fórmula Química	Características
Monossulfoaluminato (AFm)	$3.\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaSO}_4.12.\text{H}_2\text{O}$	Menos hidratada e pouco expansiva, é estável em ambiente deficiente de íons sulfato.
Trissulfoaluminato (AFt)	$3.\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3.\text{CaSO}_4.32.\text{H}_2\text{O}$	Mais hidratada e altamente expansiva, é formada e estável apenas na presença de excesso de CaSO_4 e de Ca(OH)_2 .

Do ponto de vista macroscópico, a etringita primária é distribuída homogeneamente na pasta matriz do concreto endurecido. Sua formação inicial não leva à expansão. É formada também em concretos resistentes a sulfatos e com escória de alto forno sem causar expansão. Estes tipos de concreto normalmente não expandem mesmo quando sujeitos a um ataque por fontes externas contendo sulfatos. A etringita formada pelo ataque externo por sulfatos pode ser considerada primária dependendo do mecanismo pelo qual é formada (SKALNY *et al.*, 1996).

A presença da etringita na pasta endurecida, por si só, não representa problemas para a durabilidade do concreto pois sob condições normais de cura e utilização, não leva a expansão (SKALNY *et al.*, 1996; COSTA, 2004).

Segundo Skalny *et al.* (1996), é difícil prever a quantidade de etringita formada na pasta num determinado momento por depender de múltiplos fatores e condições, ainda não compreendidos totalmente. A composição química do cimento, o tamanho das partículas, reatividade, quantidade relativa de componentes individuais do clínquer, composição da solução dos poros, presença de CO_2 , condições de cura incluindo temperatura e umidade relativa são apenas alguns dentre os diversos fatores condicionantes.

Na literatura são considerados mais dois tipos de formação de etringita, cujos mecanismos são diferentes:

- etringita secundária. No concreto endurecido úmido, passado certo tempo, a etringita poderá eventualmente sofrer dissolução e subsequente recristalização nos maiores espaços disponíveis da estrutura. Este fenômeno acontece tanto para a etringita formada primariamente como para a formada

tardamente. Assim como a primária, a etringita secundária não leva à expansão (SKALNY *et al.*, 1996; AGUIAR, 2004; MELO, 2010).

- etringita tardia. A etringita primária torna-se instável quando a temperatura encontra-se acima de 65 a 70° C. Assim, sob tais condições, a etringita primária não se formará e a que se formou antes de se atingir essa temperatura irá decompor-se. Se o concreto em questão for subsequentemente mantido em água ou condições de umidade elevada à temperatura ambiente, a etringita lentamente se forma na matriz da pasta de cimento. A este processo foi dado o nome de DEF e, após o resfriamento, pode ser seguido de expansão e fissuração da pasta, argamassa ou concreto. A expansão associada à formação de etringita não é completamente compreendida e diversos possíveis mecanismos estão sendo analisados por estudiosos no mundo todo. Resumindo, DEF é a formação da etringita já na pasta endurecida, como será visto adiante (SKALNY *et al.*, 1996; AGUIAR, 2004; MELO, 2010; MELO *et al.*, 2010).

2.4.2 Formação de etringita tardia

Um tipo especial de ataque interno por sulfatos é a formação de etringita tardia, também conhecida, como já mencionado, por DEF. Neste caso, os íons SO_4^{2-} provêm do cimento utilizado, possibilitando a neoformação da etringita nos casos em que o concreto atinge temperaturas elevadas e exposto a teores elevados de umidade na etapa de serviço (MELO *et al.*, 2010).

Caso a temperatura, durante a cura térmica por exemplo, ultrapasse aproximadamente 70° C, a etringita torna-se instável, decompondo-se para formar monossulfato hidratado. Os íons sulfato liberados pela decomposição da etringita são adsorvidos pelo silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e, quando da utilização da estrutura, no momento em que os íons sulfato são dissolvidos, a formação da nova etringita leva à expansão e à fissuração (SKALNY *et al.*, 1996, COLLEPARDI, 2003; AGUIAR, 2004; MELO, 2010).

Na Figura 5, está representada, esquematicamente, a pressão causada nos poros devido à transformação do monossulfoaluminato em trissulfoaluminato (etringita). Em cinza está representada a matriz cimentícia e em branco os vazios.

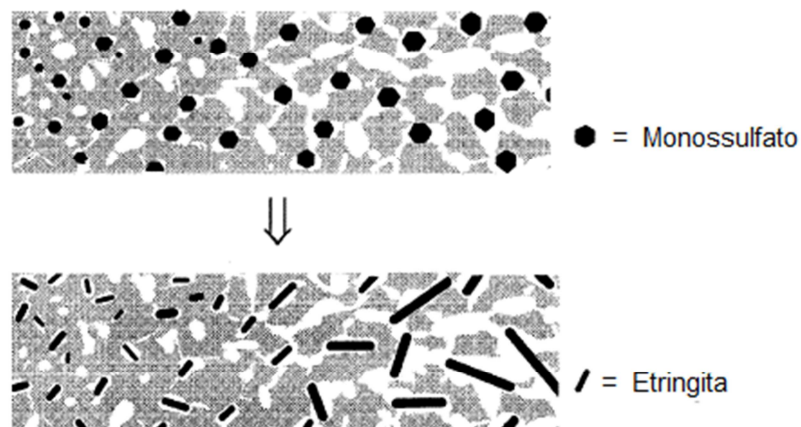


Figura 5 – Esquema representando a pressão gerada pela transformação do monossulfoaluminato em trissulfoaluminato. Adaptado de Taylor, Famy, Scrivener (2001)

A formação de etringita tardia está, de acordo com alguns autores, relacionada à conversão do monossulfoaluminato novamente em etringita, devido ao ingresso de íons SO_4^{2-} no cimento. A reação não ocorre de forma homogênea em todo o meio, possibilitando aumento de volume localizado e a consequente geração de tensões que causam fissuras nos concretos e argamassas endurecidos (Collepari, 2003; Scrivener *et al.*; 2001; Fu *et al.*, 1995).

Autores como Taylor (1997), Kuzel (1996) e Kakali *et al.* (2000) consideram que a reversão de monossulfoaluminato em etringita pode ocorrer em função do ingresso não somente de íons sulfato no sistema mas também de outros íons ou compostos como o CO_2 e a portlandita (AGUIAR; SELMO, 2004).

Segundo Melo (2010) e Kuzel (1996), o CO_2 pode estar presente no próprio cimento, na forma de fíler calcário reativo, ou incorporado a ele durante as etapas de fabricação. Nas argamassas e no concreto, o CO_2 pode ser inserido durante a colocação da água e do agregado da mistura.

Kuzel (1996) observou que em pastas de cimento com teores de CO_2 superiores a 0,45% são formados além da etringita, hemicarbonatos e monocarbonatos, conforme a Figura 6.

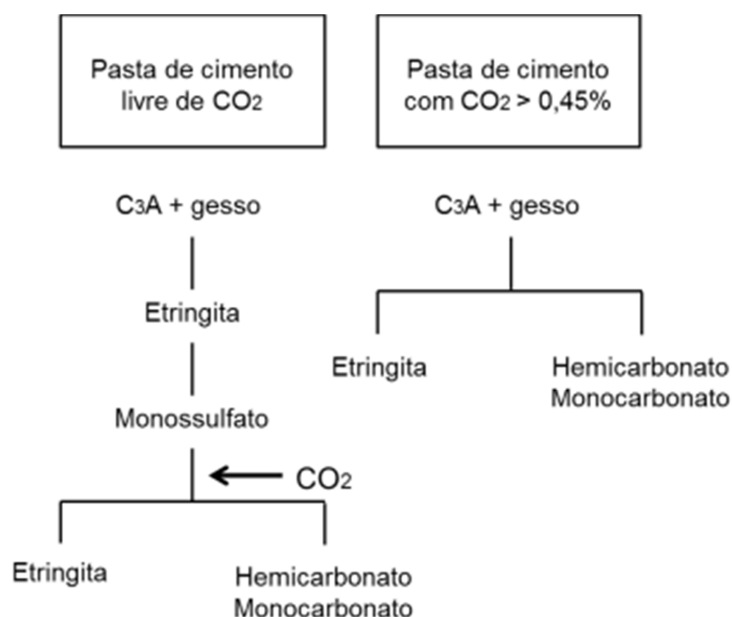


Figura 6 – Influência da presença de CO₂ nas reações de hidratação do C₃A em cimento Portland.
Adaptado de Kuzel (1996)

O monossulfato é atacado pelo CO₂, e os íons SO_4^{2-} da estrutura cristalina são substituídos pelos íons CO_3^{2-} , aumentando a concentração de íons sulfato na solução dos poros formando novamente etringita (KUZEL, 1996).

Apesar do avanço nas pesquisas de DEF, o mecanismo exato de expansão ainda não foi completamente compreendido. Segundo a maioria dos autores, a etringita primária, que é formada nas primeiras horas de hidratação do cimento, é parcial ou totalmente destruída durante a cura a temperaturas elevadas. Em seguida, quando o material é submetido a teores elevados de umidade e temperatura ambiente, a etringita tende a se formar, dando origem à etringita tardia que, devido a sua natureza expansiva pode gerar tensões locais resultando na fissuração da pasta (MELO *et al.*, 2010).

Outros pesquisadores, dentre eles Collepari, observaram que a formação de etringita tardia nem sempre está vinculada a situações em que o concreto é submetido à cura térmica e que a adsorção de sulfato pelo silicato de cálcio hidratado não é essencial para que ocorra DEF (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Collepari (2003), o ataque interno por sulfatos ocorre quando sulfatos, provenientes de agregados contaminados ou da decomposição térmica da etringita primária, são liberados tardiamente na microestrutura da pasta. Esta ação

pode ser favorecida pela existência de microfissuras (que proporcionam aumento de permeabilidade), pela deposição de etringita nessas regiões e por um ambiente que favoreça a difusão dos íons sulfato e a reação com Ca^{2+} e aluminatos, através dos poros capilares saturados de água. Quando os fatores liberação tardia de sulfatos, presença de microfissuras e exposição à água ocorrem simultaneamente, há grande possibilidade da ocorrência de ataques deletérios por sulfatos, conforme mostrado na Figura 7.

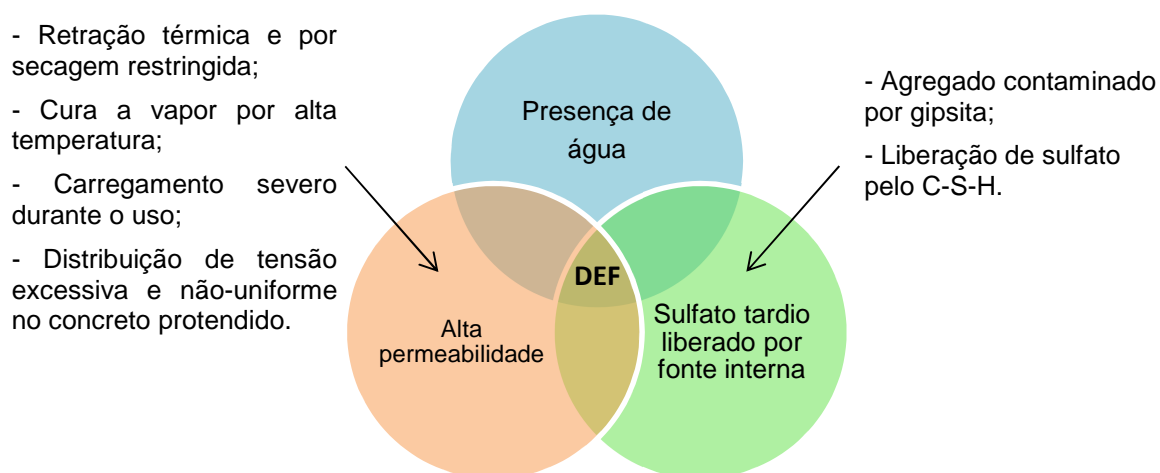


Figura 7 – Diagrama representando as condições para ocorrência de etringita tardia segundo Collepardi. Adaptado de Mehta, Monteiro (2008)

Alguns autores afirmam que a presença de fissuras multidirecionais largas (entre 20 mm e 50 mm) que atravessam a pasta e aberturas contornando os agregados, ambas interconectadas entre si e preenchidas com grandes cristais de etringita caracterizam sintomas da ocorrência de DEF numa estrutura (DIAMOND, 1996; TAYLOR, 1997; HOBBS, 1999 *apud* Melo *et al.*, 2010).

No entanto, de acordo com Skalny *et al.* (1996), estes aspectos por si só não são evidências de DEF, mas, consequências da recristalização natural da etringita no interior de espaços maiores disponíveis. A ocorrência de DEF depende dos materiais utilizados, da cura e condições do ambiente, sendo facilmente distinguida da reação álcali-agregado e de outros mecanismos de deterioração pelos métodos de microscopia.

Melo (2010) propôs um fluxograma (Figura 8) a fim de facilitar a compreensão do aspecto químico da formação de etringita.

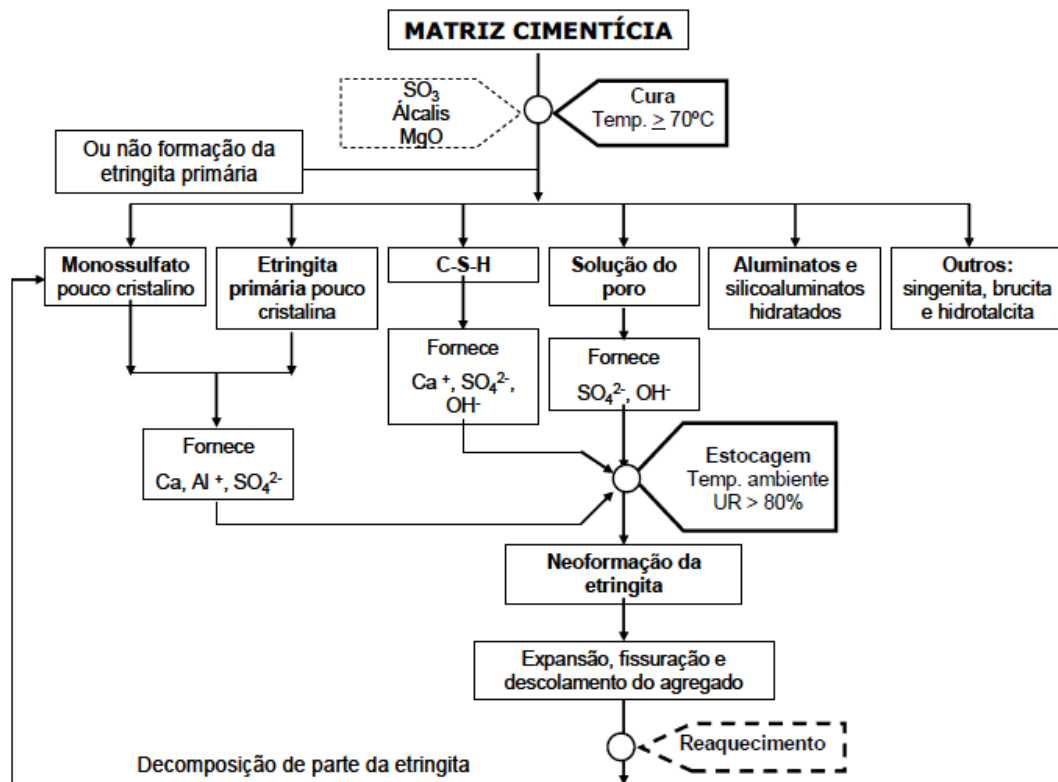


Figura 8 – Fluxograma que representa DEF (MELO, 2010)

2.4.3 Fatores que influenciam na formação da etringita tardia

Diversos fatores, quando isolados, podem não contribuir para a formação de etringita tardia, no entanto, quando ocorrem simultaneamente possibilitam a ocorrência da reação.

De acordo com Skalny *et al.* (1996) e Melo (2010), os parâmetros podem ser agrupados em características do material, condições de cura e exposição.

Com relação às características do material pode-se citar:

- a) tipo de cimento;
- b) relação sulfato/alumina;
- c) efeito do SO_3 ;
- d) quantidade de álcalis; e

- e) finura do cimento.

As condições de cura envolvem:

- a) temperatura;
- b) taxa de elevação da temperatura;
- c) aumento de temperatura devido ao calor de hidratação;
- d) período de pré-cura; e
- e) umidade relativa do ar e carbonatação.

E no que diz respeito à exposição:

- a) temperatura de exposição; e
- b) umidade relativa do ar.

2.5 Sulfetos

Outro fator que pode influenciar na durabilidade de uma estrutura de concreto é a presença de agregados contendo sulfetos na sua composição.

Em geral, as normas e os trabalhos técnicos internacionais recomendam a não utilização de agregados contaminados com sulfetos como insumo para a constituição de concretos. No entanto, de acordo com Hasparyk (2005), muitas vezes fatores econômicos e, até mesmo, ambientais têm grande influência na escolha dos materiais a serem utilizados, principalmente no caso de obras de grande porte como as estruturas hidráulicas. Para sua construção, são utilizados grandes volumes de material rochoso, resultantes de diferentes processos de extração. Nestes casos, é importante que sejam assegurados o bom desempenho e a durabilidade da estrutura.

No meio científico, ainda se encontram poucos estudos a respeito dos efeitos deletérios dos minerais sulfetados sobre o concreto bem como dos fatores intervenientes no processo de oxidação dos sulfetos quando presentes em agregados empregados em concretos. Também, durante a escolha dos materiais, normalmente são evitados componentes onde se evidencia a presença de sulfetos devido às recomendações bibliográficas disponíveis, bem como à normalização existente. Esse pode ser um dos motivos pelos quais não há muitos relatos de casos de ataque por sulfetos. A interação entre fenômenos patológicos pode também ser

um dos motivos visto que pode mascarar o processo deletério (MEHTA; MONTEIRO, 2008; GOMIDES *et al.*, 2010).

Segundo Gomides (2009) o único caso conhecido até então no Brasil é o da barragem do Rio Descoberto em Brasília, concluída em 1974, que apresentou manifestações patológicas características do processo de oxidação dos sulfetos. O que proporcionou este evento foi a utilização de agregados contendo pirita no concreto massa.

Esta barragem começou a apresentar problemas após alguns anos de operação, devido a intensos vazamentos (Figura 9) no paramento de jusante e também no interior da galeria. A partir de então passaram a surgir fissuras largas que facilitavam a entrada de água, resultando em percolação e lixiviação (Figura 10) ao longo da barragem. A solução encontrada foi a impermeabilização de montante de modo a evitar a reatividade do agregado com a água que circula na região (KFFURI, 2003).



Figura 9 – Vazamento no interior da galeria da barragem do Rio Descoberto (KFFURI, 2003)



Figura 10 – Deterioração do concreto a jusante da barragem e na galeria (KFFURI, 2003)

Outro caso relatado na bibliografia foi o da Usina Hidrelétrica de Irapé, em Minas Gerais. Durante os estudos para sua implantação, foi revelada, nos ensaios de caracterização, a presença marcante de sulfetos no maciço rochoso a ser utilizado como fonte de agregados para a obra. A partir dessa constatação foi dado início a uma série de ensaios de caráter mineralógico e geoquímico, buscando caracterizar e quantificar o teor de sulfetos e identificar os mecanismos envolvidos, avaliando a sua influência sobre o comportamento das estruturas da UHE (LIMA, 2009).

Os trabalhos de investigação adicionais foram realizados nas etapas de estudos de viabilidade, elaboração do projeto básico e do projeto executivo e subsidiaram as definições acerca da necessidade de adequações e modificações no projeto civil da UHE Irapé (LIMA, 2009).

A partir dos resultados obtidos, foram estabelecidas modificações e adequações nos projetos civis, como:

- alteração da seção típica da barragem: era prevista a construção de barramento em CCR mas, devido às incertezas quanto à utilização dos agregados em estudo para concreto, optou-se pela construção de barragem de enrocamento com núcleo de argila;
- alteração do zoneamento interno da barragem;
- alterações na disposição e no lançamento de bota-fora: foram adotados diferentes procedimentos para recuperação ambiental dos depósitos de rocha sulfetada;

- limitação à utilização de agregados com teores de S_{TOTAL} inferiores a 0,5% em concreto;

- realização de tratamento profundo de fundação; e

- inclusão de instrumentos medidores de pH na região do paramento de montante, além dos tradicionais para monitoramento da deformação do maciço de terra-enrocamento e avaliação do funcionamento do sistema de drenagem.

Ainda, de acordo com Lima (2009), os estudos realizados indicam que a ausência de alterações significativas nas propriedades mecânicas de concretos, ainda que associados ao uso de cimentos resistentes a sulfatos, não garante que o uso dos referidos agregados não venha a comprometer a durabilidade das estruturas, principalmente quando considerados períodos esperados para a sua vida útil.

Devido aos efeitos deletérios causados ao concreto, resultados da utilização de agregados contendo sulfetos, faz-se necessário o aprimoramento de métodos de ensaios para detectar presença deste material e avaliar o potencial da reação. Além disso, é fundamental que sejam conhecidas formas de prevenção que possam evitar ou minimizar os efeitos causados pelo ataque por sulfetos em obras de concreto. (FAQUINELI *et al.*, 2010; HASPARYK, 2005)

Segundo Hasparyk (2005):

“[...] torna-se relevante investigar com mais critério o processo de oxidação dos sulfetos quando presentes no concreto, ao longo do tempo, verificando os fatores intervenientes para desencadear e/ou acelerar esse fenômeno patológico, bem como a influência do tipo de aglomerante hidráulico no desenvolvimento de mecanismos de deterioração e suas consequências sobre a durabilidade e o desempenho das estruturas hidráulicas de concreto.”

Foi constatado por Faquineli *et al.* (2010) que pode haver aumento da resistência à compressão no início da reação provavelmente devido à formação de produtos decorrentes das reações químicas entre os íons sulfato, provenientes do processo de alteração dos sulfetos, com os constituintes da pasta de cimento e a solução de hidróxido de cálcio. Estes produtos neoformados podem propiciar, ao

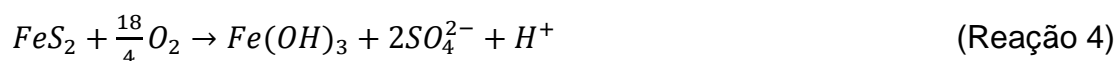
longo do tempo, a colmatação dos poros, ocasionando uma densificação da matriz e, o consequente aumento da resistência à compressão.

Em presença do oxigênio e de umidade, os minerais sulfetados alteram-se quimicamente. Os produtos da reação de oxidação bem como sua estabilidade dependem da quantidade de água disponível. Nessas condições é formado sulfato ferroso que, após a sua decomposição, resulta em hidróxido enquanto os íons sulfato reagem com os aluminatos de cálcio presentes no cimento (PEREIRA, 2008 *apud* FAQUINELI, 2010).

Além disso, pode haver a formação de ácido sulfúrico (H_2SO_4) que influenciará na redução do pH da água, dependendo da quantidade da mesma e da permeabilidade do ambiente. Como consequência pode haver manchamento da superfície do concreto e desagregação da pasta de cimento, especialmente em ambientes úmidos e quentes (NEVILLE, 1997).

Os íons sulfato reagem com os aluminatos de cálcio e também com o hidróxido de cálcio livre, produzindo gesso e etringita (sulfoaluminato de cálcio) que cristalizam-se com a água com consequente aumento de volume. Expansão esta que é seguida de fissuração progressiva de configuração irregular e desprendimento de lascas. A estrutura de concreto passa a apresentar aparência esbranquiçada característica (HASPARYK, 2005).

De acordo com Faquineli (2010) a reação no interior do concreto dada a presença de sulfetos na forma de pirita é:



Segundo Casanova *et al.* (1997), a variação volumétrica do concreto devido ao ataque por sulfatos provenientes da oxidação de sulfetos presentes nos agregados utilizados para a confecção do concreto acontece em duas etapas. A primeira deve-se à formação do hidróxido de ferro, que proporciona um aumento de volume relativamente pequeno se comparado ao da segunda etapa que se refere à formação de etringita.

Hasparyk (2005), concluiu que agregados contendo sulfetos têm influência nas propriedades de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos ao longo do tempo, devido ao processo de oxidação destes minerais. Afirma ainda que, a resistência à compressão está relacionada à quantidade de produtos gerados com a oxidação dos sulfetos e, conseqüentemente ao teor de sulfetos no agregado.

De acordo com Gomides (2009), os principais fatores intervenientes sobre o processo de oxidação de minerais sulfetados são:

- concentração de oxigênio;
- presença de umidade;
- superfície específica do sulfeto - quanto maior a superfície específica mais rápida será a sua dissolução acompanhada pelo processo de expansão;
- teor de ferro contido no sulfeto;
- presença de bactérias;
- temperatura do ambiente;
- morfologia do sulfeto; e
- pH do sistema – os sulfetos tornam-se instáveis em ambiente básico ($\text{pH} > 10$).

Ressaltando que mesmo com teores bastante baixos de sulfetos, existem casos de estruturas afetadas. Isso se deve principalmente ao tipo de mineral e às condições de exposição da estrutura.

2.6 Medidas de prevenção

Os efeitos que os ataques por sulfetos e sulfatos podem causar à microestrutura de concretos e argamassas não devem ser desprezados. O estabelecimento de critérios seguros para limites de aceitação do sulfato deverá ser um avanço importante para a tecnologia do concreto, da reciclagem e a sua aceitação pelo mercado consumidor (AGUIAR; SELMO, 2004).

No meio técnico internacional não foi estabelecido um consenso quanto aos limites de sulfatos solúveis para agregados. Os valores variam entre 0,15% a 1,0%, como pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3– Limite de sulfatos solúveis em agregados (AGUIAR; SELMO, 2004)

País	Referência	Norma	Limite de sulfatos solúveis		Aplicação
			Valor	Forma de expressão	
França	AFNOR (1994)	NF P 18 541	0,15% - em massa de agregado	SO ₄	Agregados reciclados para concreto
França	RILEM (1994)	TC 121 DRG	1,0% - em massa de agregado	SO ₃	Agregados reciclados para concreto
Alemanha	DIN (2002)	DIN 4226-100	600 mg/L	SO ₄	Agregados reciclados para concretos e argamassas
Japão	ASD (2004)	Specification 378	1,0% em massa de agregado	SO ₃	Substituição de 20% do agregado natural por reciclado, em concreto
Holanda	NEN (1990)	NEN 5936	1,0% em massa de agregado	SO ₃ *	Agregados reciclados
Itália	UNI (1999)	UNI 8520-2	0,20%	SO ₃	Agregados naturais

*Sulfatos totais (solúveis e combinados)

No Brasil, além dos ensaios tradicionais de caracterização de materiais contendo sulfatos, a única norma vigente de ensaio para agregados é a NBR 9917:2009, direcionada pela NBR 7211:2009. Esta norma especifica as características do agregado para uso em concreto e faz referência somente a sulfatos (teor máximo de 0,1% de SO_4^{2-} no agregado), deixando em aberto limites para teores de sulfetos. Caso o agregado exceda o limite do teor de sulfatos, o mesmo ainda poderá ser utilizado se o teor total de sulfatos proveniente de todos os componentes do concreto não passe de 0,2% ou se for empregado cimento resistente a sulfatos.

As metodologias nacionais e internacionais abordam apenas os sulfatos solúveis em água, não dispondo de métodos para avaliar e quantificar todas as demais fontes que possam produzir sulfatos no concreto. É o caso dos sulfetos e de fases que contenham sulfatos que não sejam solubilizáveis apenas em água, necessitando de ensaios químicos não previstos em norma.

A NBR 6118:2007, que trata também da durabilidade da estrutura, apresenta mecanismos de deterioração do concreto, dentre eles a expansão por ação de águas e solos contaminados por sulfatos que originam reações expansivas, deletérias à pasta de cimento hidratado. No entanto, está sendo considerado o ataque externo apenas, sendo assim os parâmetros e critérios apresentados nesta norma não são seguramente aplicáveis aos casos de ataque interno por sulfatos.

Mais uma vez referindo-se apenas ao ataque externo por sulfatos, o item “Requisitos de durabilidade e controle da construção” da NBR 12655:2006 estabelece alguns requisitos para concretos expostos a solos e soluções contendo sulfatos, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos da NBR 12655:2006

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água presente no solo (% em massa)	Sulfato solúvel presente na água (em ppm)	Máximo a/c (em massa) -concreto de agregado normal¹	Mínimo fck (concreto normal ou de agregado leve), MPa
Fraca	0 a 0,10	0 a 150		
Moderada ²	0,10 a 0,20	150 a 1.500	0,50	35
Severa ³	> 0,20	> 1.500	0,45	40

Nota 1. Baixa relação a/c ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de gelo e degelo; 2: Água do mar; 3: Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Com a intenção de avaliar a qualidade da água de amassamento, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, publicou em 2009 a NBR 15900 – Água para amassamento do concreto. De acordo com esta norma, para evitar as ações deletérias em questão, o teor de sulfatos na água de amassamento do concreto está limitado em 2.000 mg/L.

Conforme mencionado por Souza e John (2007), o meio técnico-científico vem criticando os métodos de avaliação do ataque por sulfatos utilizados atualmente. Segundo muitos autores, o que algumas normas estabelecem, não correspondem com o que acontece de fato em campo, dessa forma, seriam necessárias mudanças visando tornar os métodos confiáveis e fiéis às condições reais a que são submetidas as estruturas de concreto.

Ainda, de acordo com Ferraris *et al.* (1997) e Santhanam (2001) *apud* Souza e John (2007), para que sejam aperfeiçoados estes métodos de avaliação, devem ser considerados os efeitos dos produtos formados pelo indicador de degradação utilizado. De acordo com estes autores, os indicadores não levam em consideração todos os mecanismos envolvidos no ataque, ou de interferência de outras variáveis.

Dados os fatores que consistem nas possíveis causas ou então que contribuem para a ocorrência dos efeitos deletérios por sulfatos, é possível perceber que as medidas de prevenção devem envolver aspectos relacionados às características do material, condições de cura e exposição (MELO, 2010).

Com relação ao tipo de cimento, por exemplo, de acordo com Costa (2004), os cimentos que podem ser considerados resistentes a sulfatos são:

- cimentos com teor de aluminato tricálcico (C_3A) do clínquer e teor de adições carbonáticas de, no máximo, 8% e 5% em massa, respectivamente;
- cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa;
- cimentos do tipo pozolânico, que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa; e
- cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

2.7 Concreto compactado com rolo (CCR)

Concreto compactado com rolo (CCR) é um tipo de concreto que, no seu estado ainda não endurecido, deve suportar a compactação por meio de um rolo. Consiste numa evolução natural do concreto massa em obras de grande porte e

teve sua técnica baseada nos métodos utilizados para compactação de maciços terrosos (MEHTA; MONTEIRO, 2008; MARQUES FILHO, 2005).

Sua técnica construtiva permite a redução nos custos totais da obra, devido ao consumo reduzido de cimento se comparado ao concreto convencional e, também, no tempo de construção, visto que a execução é predominantemente mecanizada. Esses fatores podem ser observados na construção de grandes obras como as barragens de concreto.

O termo CCR refere-se então a uma técnica de construção de barragens de gravidade que combina as vantagens dos processos construtivos de terraplenagem com as propriedades do concreto tais como resistência e durabilidade.

2.7.1 Histórico

Datam da década de 60 as primeiras aplicações do CCR em barragens: a ensecadeira da barragem de Shimen, em Taipei, e a barragem de Alpe Gera, na Itália. Apesar de os métodos utilizados para a construção destas duas obras terem sido diferentes da técnica desenvolvida para CCR, os mesmos possibilitaram o posterior emprego deste tipo de concreto em larga escala (WENDLER, 2010; MARQUES FILHO, 2005).

Segundo Marques Filho (2005), na década de 70, foram realizados diversos estudos visando o desenvolvimento do CCR. Alguns autores buscavam, a partir de análises de laboratório referentes à técnica de compactação e ao concreto pobre, o desenvolvimento de processos de preenchimento de vazios e de aumento da compacidade. Houve destaque para:

- Jerome Raphael (1970) - propôs um trabalho teórico sobre a otimização de barragens de concreto a gravidade, tratando-o ainda como material grosseiro;
- Moffat (1973) – propôs um trabalho sobre o desenvolvimento de CCR aplicado a barragens de concreto;
- Cannon (1972 e 1974) – apresentou resultados de testes de compactação desenvolvidos na barragem de Tims Ford, nos Estados Unidos.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a primeira aplicação bem-sucedida de volumes elevados de CCR ocorreu em 1974, durante o reparo do túnel de entrada da barragem Tarbela, no Paquistão. A alta produtividade foi uma evidência do potencial deste método de construção.

Em 1982, foi construída a primeira obra de grande porte de CCR, a barragem de Willow Creek, nos Estados Unidos. A estrutura foi concluída com 52 m de altura e 317.000 m³ em volume de CCR. Este projeto deu enfoque maior à aplicação da técnica e construtiva, não havendo maiores cuidados com relação à execução de juntas e ao aparecimento de posteriores fissurações. Dessa forma, durante a operação, surgiram vazamentos excessivos que precisaram ser corrigidos com injeções de calda de cimento (MARQUES FILHO, 2005; ANDRIOLO, 1998).

Ainda nos anos 80, a técnica de construção com CCR passou a ser utilizada em diversos países do mundo, tendo sua principal aplicação em barragens. Conforme o método foi evoluindo, os resultados obtidos consistiam em concretos com excelentes propriedades mecânicas e baixa permeabilidade.

No Brasil, a primeira aplicação de CCR em barragens aconteceu em 1986, na barragem de Saco de Nova Olinda, na Paraíba. Com 56 m de altura, esta barragem foi construída com um volume aproximado de 135.000 m³ de CCR (MARQUES FILHO, 2005).

Nos anos 90, duas barragens de grande porte em concreto compactado com rolo foram construídas no Paraná: Derivação do Jordão (1996), com 95 m de altura 547.000 m³ de CCR, e a barragem da Usina Hidrelétrica Salto Caxias (1998), com 67 m de altura em média e aproximadamente 912.000 m³ de CCR (COPEL).

De 1996 a 2002 a utilização da técnica do CCR teve um aumento significativo, conforme mostrado na Figura 11. Ao final de 1996 foram concluídas 157 barragens de CCR em 20 países, já após 2002, este número passou para 251 (TRABOULSI, 2007).

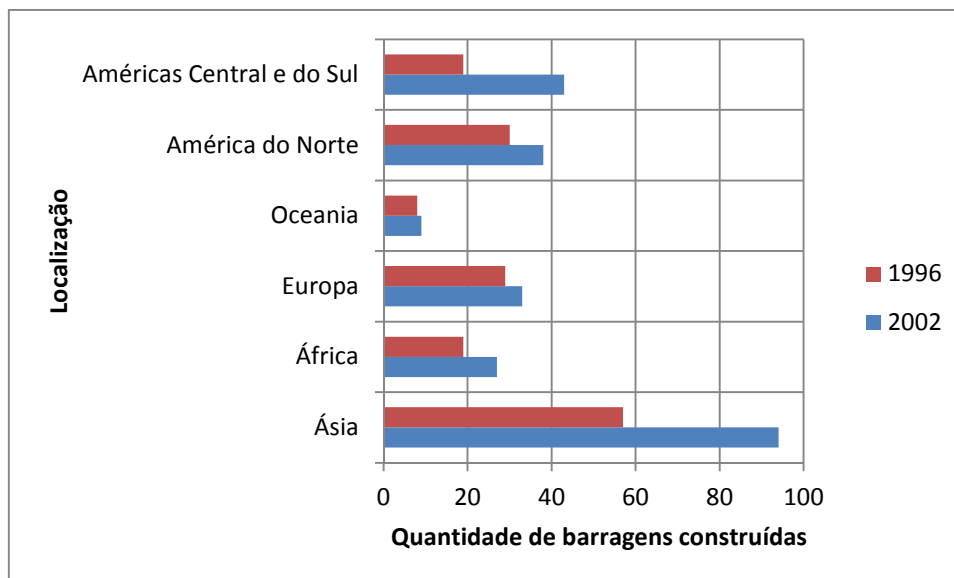


Figura 11 – Barragens de CCR concluídas ao final de 1996 e de 2002 (FARIAS, 2006 *apud* TRABOULSI, 2007)

Nos dias de hoje, a aplicação do CCR ainda consiste numa solução competitiva no âmbito nacional. Nas obras mais recentes, vem sendo utilizado o lançamento em concreto rampado, buscando minimizar a utilização de argamassa de ligação entre camadas.

2.7.2 Definição

De acordo com Oliveira e Salles (1995), o concreto compactado com rolo é um concreto de consistência seca, aspecto arenoso e com propriedades próprias, que é transportado, espalhado e compactado continuamente pelas máquinas de aplicação em obras de terra e enrocamento.

Como objetivos deste método pode-se citar: máxima velocidade no lançamento, baixos custos, teores de cimento pequenos de forma a minimizar os efeitos de variações volumétricas de origem térmica (MARQUES FILHO, 1995; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Abreu e Figueiredo (2003), o CCR utilizado em barragens deverá apresentar consumo de cimento reduzido de forma a assegurar um baixo calor de hidratação.

Andriolo e Krempel (1996) apontam as características que os materiais utilizados como componentes do CCR deverão apresentar, conforme demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações técnicas de materiais para CCR (ANDRIOLO; KREMPEL, 1996)

Material	Quesito	Fatores a considerar
AGLOMERANTE	Tipo	Geração de calor, desenvolvimento de resistência, sanidade, compatibilidade com os agregados; Disponibilidade de material pozolânico próximo à obra; Inclusão ou não de finos ativos.
	Estocagem	Distância do fornecedor à obra; Ciclo do sistema de transporte; Temperatura de fornecimento.
	Material pozolânico	Quantidade de hidróxidos liberados durante a hidratação do cimento, atividade pozolânica (referentes ao ganho de resistência e de inibição de reações expansivas); Garantia de suprimento e estocagem mínima.
AGREGADOS	Origem	Definição da jazida.
	Tamanho máximo	Entre 25 e 150 mm (D_{max} superior a 63 mm pode provocar segregações sistemáticas, sem vantagens econômicas, entretanto D_{max} inferior a 50 mm, aumenta a demanda de agregado miúdo, o que pode onerar a mistura).
	Teor de finos e Curva Granulométrica	-
	Forma	A importância da forma dos agregados se faz sentir no proporcionamento da mistura. A exigência de forma cúbica é uma preferência.
	Densidade	-
	Sanidade	-
	Resistência mecânica e ao desgaste	Resistência mecânica do agregado não é primordial visto que para barragens, as resistências mecânicas requeridas são baixas (<15 MPa).
	Absorção e umidade	Influência na consistência da mistura.
ADITIVOS	-	-
ÁGUA	-	-

Para a construção de uma barragem de CCR podem ser utilizados dois métodos: o tradicional, onde se trabalha com camadas horizontais e o rampado, em que o lançamento é efetuado em camada que forma uma rampa.

Também conhecido por Método Chinês, o método rampado consiste, de acordo com Marques Filho (2005), em:

“Nesta proposta, diminui-se a área de espalhamento e compactação, subindo a barragem entre as juntas de contração, permitindo o lançamento de camadas discretas de pequeno volume constantemente. As camadas são colocadas com pequena inclinação com relação à horizontal de modo a permitir o acesso do rolo, podendo a superfície ser retomada para a próxima camada em um intervalo de tempo relativamente curto. O programa de lançamento, com tempo reduzido entre camadas sucessivas, diminui, e até pode evitar, a necessidade de utilização de argamassa de ligação. O processo reconstitui basicamente as condições básicas das barragens com concreto massa no que se refere às alturas entre camadas, com menor número de juntas frias, e com juntas de contração bem definidas.”

“[...] Além das vantagens citadas, a colocação em camadas sucessivas permite uma distribuição mais homogênea dos volumes colocados de concreto, otimizando a utilização dos equipamentos, podendo gerar condições de maiores produções médias.”

Na Figura 12, está apresentado um desenho esquemático proposto por Mehta e Monteiro (2008) para representar a sequência de construção com CCR.

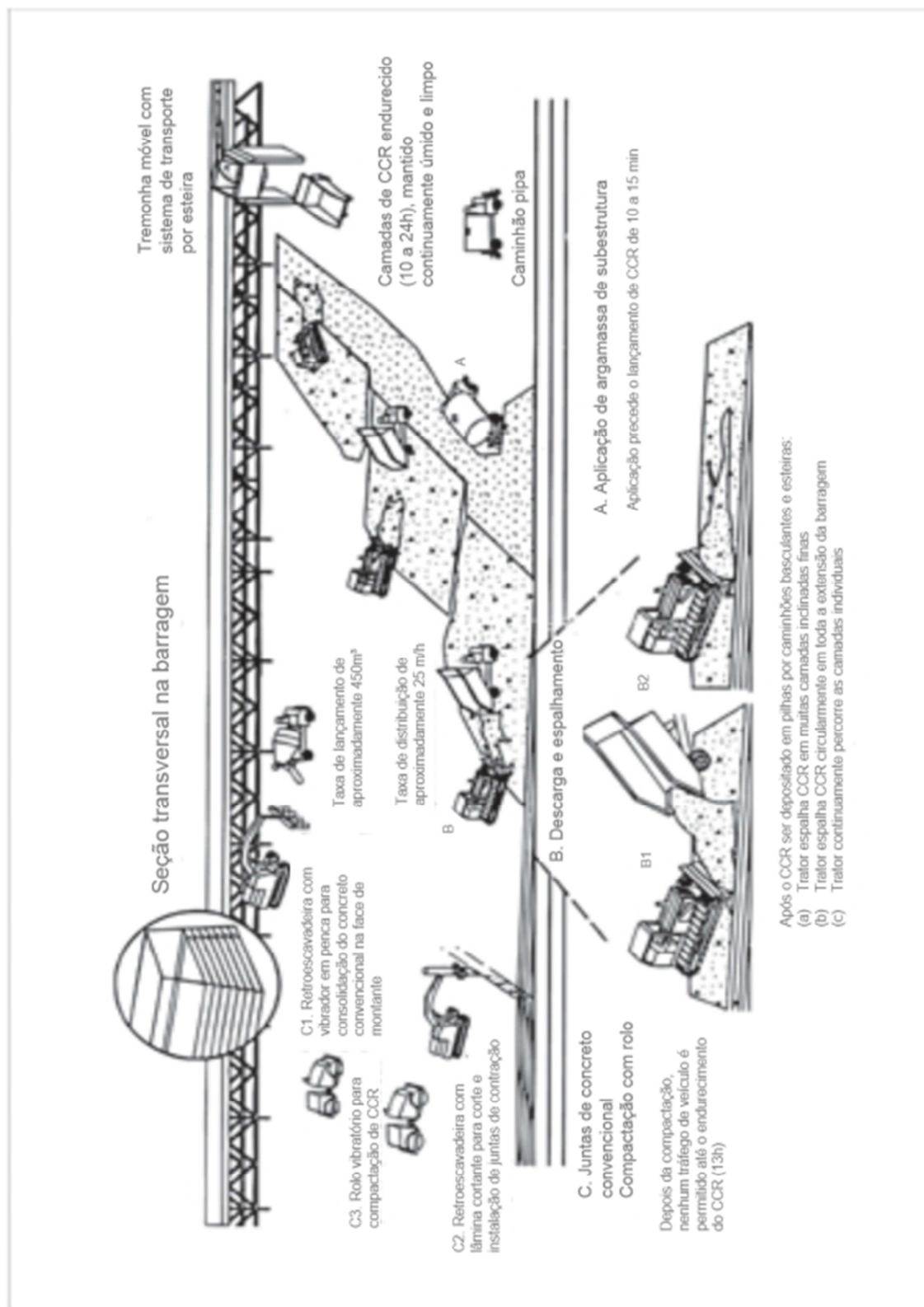


Figura 12 – Sequência de construção com CCR (MEHTA; MONTEIRO, 2008)

2.7.3 CCR com alto teor de finos

Com a intenção de minimizar vazios e também o consumo de clínquer, usualmente as dosagens de CCR utilizavam grandes porcentagens de pozolana por volume de concreto. Entretanto no Brasil a disponibilidade de cinzas volantes é limitada, gerando então a necessidade de utilização de materiais alternativos (MARQUES FILHO, 2005). A solução encontrada foi o uso intensivo de agregados miúdos pulverizados de forma a reduzir o consumo de cimento, diminuindo os efeitos das variações de volume apresentadas pelas estruturas de concreto massa.

O concreto desenvolvido com as características citadas é denominado usualmente como CCR com alto teor de finos (CCRATF) ou “Método Brasileiro”.

A utilização de finos tem influência direta na trabalhabilidade do concreto, garantindo maiores coesão e massa específica, redução de vazios e, conseqüentemente, redução da permeabilidade da estrutura. Para obter a coesão necessária e minimizar os vazios, geralmente necessita-se de um consumo mínimo de agregado pulverizado de 160 kg/m^3 , garantindo assim grau de compactação adequado. Mesmo com o baixo consumo de cimento, a porosidade do CCR é baixa visto que o Grau de Compactação mínimo exigido é de 98% (MARQUES FILHO, 2005).

O consumo de cimento em barragens gira em torno de 70 e 100 kg/m^3 já que as resistências à compressão requeridas (entre 7 e 12 MPa) são relativamente inferiores às resistências exigidas para estruturas de concreto convencional. Além disso, no CCRATF utiliza-se cerca de 120 a 160 kg/m^3 de agregados pulverizados, que aumentam significativamente a superfície específica do agregado total, tornando-o mais suscetível a reações químicas em geral (MARQUES FILHO, 2005).

De acordo com Traboulsi (2007), a particularidade de consistência do CCR, com baixo teor de água e alto teor de finos, requer avaliação contínua do processo de mistura e transporte.

A combinação dos fatores baixa resistência, baixa permeabilidade, baixa porosidade e baixo consumo de cimento com a alta superfície específica do agregado pode potencializar efeitos deletérios gerados por reações químicas. Devido à baixa permeabilidade destes concretos, possíveis expansões podem gerar panoramas de fissuração significativos.

3 DESCRIÇÃO DO CASO – CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO MÉDIA DO RIO TIBAGI

A região intermediária do rio Tibagi situa-se sobre rochas sedimentares paleozoicas da Bacia do Paraná. A evolução da Bacia do Paraná fez-se em diversos ciclos geológicos e estende-se basicamente pela região oeste do estado. O tipo de rocha encontrado na região, diabásio, pode apresentar acúmulo de material orgânico que propicia determinadas concentrações de enxofre.

Para implementação dos diversos empreendimentos do rio Tibagi, vários estudos dos materiais disponíveis na região foram executados para avaliação da possibilidade de sua utilização como material de construção.

A avaliação de resistências mostrou um desvio no rendimento em termos de resistência x consumo de cimento, que poderia ter sido gerado por alguns fatores como mudança na qualidade das cinzas volantes, nos procedimentos de ensaio, adensamento inadequado dos corpos de prova, cura, entre outros.

Como o fenômeno de intrusão de produtos com enxofre seria descartado pela adequação do material às normas brasileiras, uma pesquisa inicial sobre as causas da diminuição do rendimento em alguns ensaios não considerou essa hipótese.

Acidentalmente, ao observar corpos de prova rompidos, verificou-se a presença de pontos brancos no concreto que gerou a presente pesquisa.

Após a análise da pedreira desativada, em período de seca, pôde-se observar, anos depois, a deposição de material esbranquiçado na mesma, conforme mostrado nas Figuras 13 a 18:



Figura 13 – Deposição de material pulverulento



Figura 14 – Surgência de material esbranquiçado



Figura 15 – Talude com presença de sais



Figura 16 – Deposição de material pulverulento de cor esbranquiçada



Figura 17 – Detalhe do acúmulo de material esbranquiçado no entorno dos agregados



Figura 18 – Agregados com presença de material esbranquiçado

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para verificar a influência dos materiais detectados na pedreira em relação a uma estrutura de CCR, foram coletadas amostras do local e, também, moldados corpos de prova.

A partir das análises realizadas, este trabalho teve a intenção de estabelecer:

- comparação técnica entre os ensaios executados e os parâmetros mecânicos apresentados pelo CCR;
- comparação técnica entre resultados baseados nas normas vigentes e os resultados obtidos a partir de ensaios não regulamentados;

Para diminuição de custos e obtenção de referência de resultados, foram adotados os materiais e traços utilizados na construção da Usina Hidrelétrica Mauá, no Paraná.

4.1 Caracterização dos materiais

Os ensaios do material objeto de estudo desta dissertação foram feitos com os mesmos procedimentos e controle do concreto da UHE Mauá por uma questão de otimização de recursos e balizamento de resultados, conforme dito anteriormente.

Foram analisados: cimento, agregados, aditivo, água utilizada para amassamento e a dosagem do concreto.

4.1.1 Aditivo

Os aditivos similares aos utilizados na obra da UHE Mauá foram submetidos à análise físico-química. Foram avaliados: teor de sólidos, pH e densidade, seguindo-se como critério de avaliação os limites especificados pelo fabricante do produto.

A influência do aditivo na resistência final dos CP's de CCR foi verificada a partir da realização de um ensaio comparativo entre os CP's moldados com aditivo, conforme o CCR padrão deste estudo, e outros moldados sem aditivo.

4.1.2 Cimento

Foram realizados ensaios físicos e químicos no cimento visando a sua caracterização, atendendo ao estabelecido na norma relacionada (NBR 5736:1991 Versão Corrigida: 1999) e à especificação do fabricante.

Também, para verificar se o cimento utilizado neste estudo teve influência no rendimento do CCR dosado, foi realizado o ensaio comparativo entre CP's moldados com o cimento deste estudo e CP's moldados com cimento de outra marca. Os demais materiais não foram alterados.

4.1.3 Água

Visando à obtenção de referências adequadas ao estudo, foi coletada amostra de água do rio Tibagi para análise das propriedades físico-químicas com o intuito de verificar seu emprego como água de amassamento dos concretos produzidos no canteiro de obras.

Para analisar a influência da água do reservatório para o amassamento do concreto na evolução da sua resistência à compressão, foram moldados CP's utilizando a água padrão deste estudo e CP's com água destilada. Os demais materiais (cimento, aditivo, agregados) não foram alterados.

4.1.4 Agregados

Os agregados utilizados no estudo de sulfatos foram submetidos a ensaios e análises visando a sua caracterização conforme recomendações das normas vigentes. Foram utilizados como referência, os limites mínimos e máximos estabelecidos nas mesmas.

Com a intenção de constatar também se os agregados utilizados neste estudo poderiam ser responsáveis por algum efeito danoso ao CCR, com relação a sua resistência mecânica à compressão, foi realizado um ensaio comparativo entre CP's contendo os agregados deste estudo e outros com agregados utilizados na obra da PCH Moinho. Os demais materiais (cimento, água e aditivo) foram os mesmos para os dois tipos de CP's conformados.

4.1.5 Dosagem do CCR

Foram utilizadas dosagens de CCR baseadas na obra da UHE Mauá, conforme apresentado na Tabela 6, permitindo uma validação a partir da comparação dos resultados com o Controle de Qualidade da obra. No Anexo C é possível verificar as características de ambos os traços (CCR 01 e CCR 02), em termos de: i) traço CCR; ii) consumo de cimento; iii) massa de água de amassamento; iv) quantidades de agregados miúdos, artificiais e graúdos; v) teor de aditivo; vi) massa unitária; vii) índice Vebe; viii) massa unitária Vebe; ix) grau de compactação Vebe; x) massa unitária DMA; xi) resistência à compressão axial aos 7, 28, 90 e 180 dias; e xii) rendimento aos 28, 90, 180 e 360 dias.

Tabela 6 – Traços de CCR 01 e CCR 02

Dosagem do CCR	Valores	
	CCR 01	CCR 02
Cimento (kg/m ³)	80	85
Água (kg/m ³)	135	125
Areia artificial (kg/m ³)	1254	1271
Brita 25 mm (kg/m ³)	733	614
Brita 50 mm (kg/m ³)	489	614
Relação a/c	1,69	1,47
Aditivo (kg/m ³)	0,96	1,02

4.2 Matriz experimental

Para a realização do ensaio de resistência à compressão, foram moldados corpos de prova (15 x 30 cm) de CCR 01 (consumo de cimento de 80 kg/m³) e de CCR 02 (85 kg/cm³). A quantidade de amostras é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Quantidade de CP's moldados para realização de ensaio de resistência à compressão

Idade de rompimento	Quantidade de CP's	
	CCR 01	CCR 02
7 dias	71	691
28 dias	71	691
90 dias	71	691
180 dias	71	688
360 dias	64	397
TOTAL	348	3158
	3506	

As amostras foram divididas em lotes de 30 CP's, com a intenção de identificar a existência de variação nos resultados.

Para a verificação dos materiais responsáveis pelos resultados obtidos, foram realizados ensaios comparativos. Sendo assim, foram confrontados resultados de ensaios mecânicos de concretos confeccionados com mesmo traço, sendo alterado apenas o material que se desejava determinar a influência nos efeitos observados nos ensaios de resistência à compressão. Por exemplo, para analisar se o cimento era o material responsável pelo baixo rendimento da resistência mecânica à compressão do concreto, foram moldados CP's utilizando-se o mesmo traço e os mesmos materiais, com exceção do tipo de cimento. Na Tabela 8, está apresentada a quantidade de CP's moldados para cada análise.

Tabela 8 – Quantidade de CP's moldados para verificação dos resultados obtidos pelos ensaios comparativos

Material analisado	Quantidade de CP's
Cimento	16
Água	16
Aditivo	16
Agregado	16
TOTAL	64

4.3 Ensaios

Buscando verificar a influência do material esbranquiçado depositado nos taludes de onde foram obtidos os agregados, foram feitas análises e acompanhamento da resistência à compressão dos CP's e ensaios complementares.

Estão previstos em normas brasileiras para análise dos agregados, de acordo com a Tabela 9:

Tabela 9 – Ensaios acreditados pela Cgere/Inmetro realizados

Ensaios acreditados pela Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro
Análise química por gravimetria
Determinação da pozolanicidade
Determinação da área específica
Determinação da massa específica
Finura por meio da peneira #200
Tempos de início e fim de pega
Determinação de resistência à compressão em argamassa

Já os ensaios realizados não previstos em norma estão apresentados na Tabela 10:

Tabela 10 – Ensaios não acreditados pela Cgere/Inmetro realizados

Ensaios não acreditados pela Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro
Determinação do enxofre na forma de sulfetos e sulfatos em agregado
Difratometria Raios X
Microscopia ótica de luz transmitida - análise petrográfica/mineralógica
Microscopia ótica de luz refletida para análise qualitativa e quantitativa de sulfetos
Microscopia eletrônica de varredura - análise da microestrutura
Análise química por fluorescência de raios X

A seguir serão explicados alguns dos métodos complementares utilizados tanto para análise quanto para a caracterização dos materiais provenientes da região do rio Tibagi.

4.3.1 Difração de Raios X

A difração de raios X (DRX) é uma técnica bastante importante na identificação qualitativa das fases cristalinas presentes em materiais, através das duas distâncias interatômicas, baseada na Lei de Bragg. De acordo com Ribas (1996) *apud* Faquineli (2010), o método de difração de raios X utilizando amostra policristalina ou pó é único pois trata-se do único método analítico capaz de fornecer informações qualitativas e quantitativas sobre os compostos presentes numa amostra sólida. Neste método, a amostra deve ser moída até apresentar a granulometria máxima de 80 μm .

Esta técnica é a mais indicada na determinação das fases cristalinas presentes em materiais. Dentre as suas vantagens estão a rapidez do método e a confiabilidade dos resultados obtidos (DAL MOLIN, 2007).

Os planos de difração, as distâncias interatômicas e as densidades dos elétrons são características únicas para cada substância cristalina. Dessa forma, se houver concordância exata entre o padrão produzido por uma amostra conhecida e o de uma amostra desconhecida, por conseguinte a identidade química da amostra que se deseja identificar pode ser atribuída (SKOOG *et al.*, 2002 *apud* FAQUINELI, 2010).

Os ensaios de difração de raios X referentes a este trabalho foram realizados pelo LACTEC e pelo Laboratório de Furnas.

Foram analisadas amostras de agregados, amostras extraídas dos CP's (agregados, argamassas e pós raspados) e amostras já encaminhadas na forma de pó. Os estudos envolveram as amostras na condição integral, empregando-se os métodos orientado e não orientado.

Para o método não orientado, o preparo das amostras foi efetuado a partir da moagem dos materiais em almofariz com mão de gral até a obtenção de material

inferior a 45 μm (passante na peneira nº 325), sendo na sequência submetido à análise por difração para identificação dos compostos cristalinos presentes.

No método com orientação, que tem como objetivo a avaliação da fração mais fina da amostra, foi realizada uma série de procedimentos a partir da separação da fração argila por sedimentação em coluna, seguida por montagem em vidro de três lâminas orientadas para cada registro. Nestas lâminas foi realizada uma análise natural, apenas com secagem ao ar, e uma análise glicolada, em que, após saturação da lâmina contendo a fração argila com etileno-glicol em dessecador, colocado sobre chapa aquecida a 50° C por doze horas, colocado para garantir a completa saturação da atmosfera interna do dessecador e assim possibilitar a identificação dos argilominerais expansivos. A terceira lâmina foi destinada à análise calcinada buscando a indicação da presença de minerais que passam por retração ou colapso total de sua estrutura quando submetida à permanência em mufla a 550° C, por três horas.

4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) possibilita a análise qualitativa da microestrutura de amostras e, qualitativamente, pode-se inferir sobre as fases presentes, pela análise da morfologia apresentada a altas resoluções e seus respectivos espectros da análise química elementar, pelo uso de uma microsonda analítica de raios X. É uma técnica bastante utilizada, pois, garante a observação e a interpretação dos aspectos morfológicos dos materiais sólidos (DAL MOLIN, 2007; FAQUINELI, 2010).

Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura referentes a este trabalho foram realizados pelo LACTEC e pelo Laboratório de Furnas.

As análises por MEV foram executadas em amostras de concreto com superfícies de fratura, usando-se o detector de elétrons secundários. Para tanto, os concretos foram fraturados com uso de martelo, ponteira e talhadeira com o intuito de realizar uma inspeção visual interna inicialmente, localizar eventuais regiões com alteração e selecionar material para análise, fazendo paralelamente o uso de lupa. Após seleção de material suficiente e representativo para análise, a superfície das

amostras recebeu a deposição de uma fina camada de material condutor (neste caso, a base de ouro) para permitir a visualização ao MEV.

Associado à microanálise, foi possível avaliar a estrutura interna dos materiais e verificar a presença de produtos formados tardiamente.

Foi utilizado o microscópio eletrônico da marca Philips, modelo XL30.

4.3.3 Microscopia Ótica

Método utilizado para análise e caracterização de materiais a partir da utilização de luz visível. Por esta técnica pode-se observar grande parte dos defeitos cristalinos e constituintes maiores que 0,2 μm . Sua grande vantagem é possibilitar a análise de grandes áreas num curto espaço de tempo, além de consistir num método simples e pouco dispendioso (DAL MOLIN, 2007).

Os ensaios de microscopia ótica referentes a este trabalho foram realizados pelo Laboratório de Furnas.

As análises por microscopia ótica de luz transmitida foram realizadas em lâminas delgadas a partir das amostras de agregado e permitiram a sua classificação de origem, identificação de seus constituintes mineralógicos com o percentual semiquantitativo, além de verificar os minerais potencialmente reativos do ponto de vista da RAA, entre outras características relacionadas à textura e relações petrogenéticas.

Já na análise por microscopia ótica com uso de luz refletida, foi possível identificar os minerais opacos, e, mais especificamente, os sulfetos presentes nestes opacos em seções polidas das amostras de agregados. Observou-se sua textura, as alterações e inter-relações entre estes minerais presentes. Nesta etapa de estudo foi realizada, portanto, uma análise tanto qualitativa como semiquantitativa, avaliando também o percentual dos minerais presentes, em função dos padrões visuais existentes, em amostras dos agregados pulverizados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos materiais

Os resultados obtidos dos materiais analisados estavam dentro dos limites mínimos e máximos estabelecidos pelas normas nacionais e internacionais adotadas como parâmetros, demonstrando suas adequações ao uso, conforme apresentado nos próximos subitens.

5.1.1 Aditivos

Os resultados analíticos foram reunidos na Tabela 11. Todas as amostras analisadas estiveram adequadas para o uso, estando seus valores dentro do especificado pelo fabricante.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios químicos dos aditivos

Aditivo plastificante de pega normal			
	Teor de sólidos (%)	pH	Densidade (g/cm ³)
Resultado ensaios	31,4	7,3	1,16
Limites Fabr.	28,5 a 31,5	6,0 a 8,0	1,16 a 1,20

Aditivo superplastificante de alto desempenho			
	Teor de sólidos (%)	pH	Densidade (g/cm ³)
Resultado ensaios	29,6	4,9	1,06
Limites Fabr.	25,5 a 31,5	4,0 a 6,0	1,04 a 1,08

Aditivo plastificante multifuncional retardador de pega			
	Teor de sólidos (%)	pH	Densidade (g/cm ³)
Resultado ensaios	43,8	5,5	1,23
Limites Fabr.	41,3 a 45,6	4,5 a 6,5	1,21 a 1,25

Aditivo plastificante retardador de pega			
	Teor de sólidos (%)	pH	Densidade (g/cm ³)
Resultado ensaios	37,6	3,2	1,18
Limites Fabr.	36,1 a 39,9	3,0 a 5,0	1,16 a 1,20

5.1.2 Cimento

Conforme apresentado na Tabela 12 e na Tabela 13, os resultados do cimento CPIV-32 encontram-se dentro dos limites especificados pela legislação, sendo, portanto, adequado seu uso nas respectivas dosagens.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios físicos mecânicos do cimento

Propriedades Físicas							
	# 200 (%)	# 325 (%)	Blaine (cm ² /g)	Massa específica (g/cm ³)	Início de pega (h)	Fim de pega (h)	Exp. a quente (mm)
Resultados	0,4	1,5	4.560	2,71	04:30	05:00	0
Limites NBR 5736	< 8	*	*	*	> 1	< 12	< 5
Situação	Atende	-	-	-	Atende	Atende	Atende
Resistência Mecânica à Compressão							
	3 dias (MPa)		7 dias (MPa)		28 dias (MPa)		
Resultados	22,7		28,9		39,2		
Limites NBR 5736	> 10 MPa		> 20 MPa		< 32 MPa		
Situação	Atende		Atende		Atende		

* Não são definidos limites para estes ensaios na NBR 5736/91

Tabela 13 – Resultados dos ensaios químicos do cimento

Parâmetros químicos						
	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)
Resultados	32,92	10,81	3,15	41,16	2,96	1,33
Limites NBR 5736	*	*	*	*	< 6,5	*
Situação	-	-	-	-	Atende	-
	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)	SO ₃ (%)	CaO (%)
Resultados	0,30	0,14	0,55	0,10	2,60	0,92
Limites NBR 5736	*	*	*	*	< 4	*
Situação	-	-	-	-	Atende	-
Parâmetros físicos						
	PF (%)			RI (%)		
Resultados	4,51			29,25		
Limites NBR 5736	< 4,5			*		
Situação	Atende			-		

* Não são definidos limites para estes ensaios na NBR 5736/91

5.1.3 Água

Comparando-se os resultados obtidos e apresentados na Tabela 14 com os limites de valores estabelecidos pelas normas vigentes, a NBR 15900:2009 e a NBR NM 137, a água do rio Tibagi foi aprovada para utilização sem necessidade de tratamento.

Na Tabela 15, estão listados os resultados de dosagens de concretos conformados com a água destilada e com a água do rio Tibagi, respectivamente. Tanto a resistência mecânica à compressão quanto o tempo de pega, demonstraram comparativamente, não haver diferenças significativas entre ambas, podendo, portanto, ser utilizada a água do local para a conformação do concreto.

Tabela 14 - Análise física da água

	Período	Valores limites		Resultados	Comparativo de resultados		Situação	
		NM 137	NBR 15900		NM 137	NBR 15900	NM 137	NBR 15900
Resistência à compressão em água destilada – MPa	7 dias	-	-	26,3	-	-	-	-
	28 dias	-	-	35,7	-	-	-	-
Resistência à compressão em água Tibagi - MPa	7 dias	-	-	24,8	-	-	-	-
	28 dias	-	-	32,6	-	-	-	-
Relação entre a água do rio Tibagi e a água dest. - %	7 dias	> 10	> 90	24,8	5,70	94,30	Atende	Atende
	28 dias	> 10	> 90	32,6	> 10	91,30	Atende	Atende
Tempo de pega com água destilada. - min	Início	-	-	210	-	-	-	-
	Fim	-	-	240	-	-	-	-
Tempo de pega com água do rio Tibagi. - min	Início	-	-	220	-	-	-	-
	Fim	-	-	270	-	-	-	-
Relação do tempo de pega entre a água do rio Tibagi e a água dest. - %	Início	≥ 30	< 25	-	10	4,55	Atende	Atende
	Fim	≥ 30	< 25	-	30	11,11	Atende	Atende

Tabela 15 - Análise química da água

	Valores limites		Resultados	Situação
	NBR NM 137	NBR 15900		
Teor de sólidos (mg/L)	< 5.000	< 50.000	69	Atende
Matéria orgânica (mg/L)	-	-	26	-
Sulfatos (mg/L)	< 2.000	< 2.000	13,6	Atende
pH	5,5 a 9,0	≥ 5,5	6,2	Atende
Cloretos (mg/L)	< 700	< 1.000	3,3	Atende

5.1.4 Agregados

Os resultados estão demonstrados entre a Tabela 16 e a Tabela 19. Todos encontram-se dentro do recomendado pelas normas referenciadas, podendo o material ser utilizado nas referidas dosagens.

Tabela 16 - Ensaio de caracterização de agregados - Areia artificial

Ensaio	Norma	Resultados	Tolerância	Situação
Módulo de finura	NBR NM 248	2,78	2,3 < mf < 3,2	Atende
Teor de material pulverulento, (%)	NBR NM 46	14,30	14 < pulv. < 22	Atende
Absorção de água, (%)	NBR NM 30/01	1,30	-	-
Massa específica, (g/cm ³)	NBR NM 52/02	2,88	-	-
Coeficiente de inchamento	NBR 6467/06	1,37	-	-
Teor de argila em torrões e partículas friáveis, (%)	NBR 7218/87	0,10	< 1,00%	Atende
Sanidade ao ataque de sulfato de sódio (total)		1,50		
Peneira # 4,75 mm, (%)		0		
Peneira # 2,36 mm, (%)	ASTM C 88/05	0,30	< 10%*	Atende
Peneira # 1,18 mm, (%)		0,30		
Peneira # 0,60 mm, (%)		0,40		
Peneira # 0,30 mm, (%)		0,50		

* Refere-se à ASTM C33.

Tabela 17 - Ensaios de caracterização de agregados – Brita 9,5 mm

Ensaios	Norma	Resultados	Tolerância	Situação
Módulo de finura	NBR NM 248	5,66	Limites curvas	Atende
Teor de material pulverulento, (%)	NBR NM 46	2,00	< 1%	Atende
Absorção de água, (%)	NBR NM 30/01	1,50	-	-
Massa específica, (g/cm ³)	NBR NM 52/02	2,96	> 2,80	-
Abrasão Los Angeles, (%)	NBR NM 51/01	14,00	< 50%	-
Teor de argila em torrões e partículas friáveis, (%)	NBR 7218/87	0	< 0,50%	Atende
Sanidade ao ataque de sulfato de sódio (total)		0,80		
Peneira # 9,50 mm, (%)		0		
Peneira # 4,75 mm, (%)		0,40		
Peneira # 2,36 mm, (%)	ASTM C 88/05	0,40	< 12%*	Atende
Peneira # 1,18 mm, (%)		0		
Peneira # 0,60 mm, (%)		0		
Peneira # 0,30 mm, (%)		0		

* Refere-se à ASTM C33.

Tabela 18 - Ensaios de caracterização de agregados – Brita 25 mm

Ensaios	Norma	Resultados	Tolerância	Situação
Módulo de finura	NBR NM 248	6,94	Lim. curvas*	Atende
Teor de material pulverulento, (%)	NBR NM 46	0,90	< 1,00%	Atende
Absorção de água, (%)	NBR NM 30/01	0,90	-	-
Massa específica, (g/cm ³)	NBR NM 52/02	2,97	> 2,80	Atende
Teor de argila em torrões e partículas friáveis, (%)	NBR 7218/87	0	< 0,50	Atende
Índice de forma, método do paquímetro	NBR 7809/83	2,20	<3,00**	Atende
Abrasão Los Angeles, (%)	NBR NM 51/01	10,00	< 50,00	Atende
Ciclagem acelerada com etilenoglicol, (%)	NBR 12697/92	4,20	-	-
Ciclagem artificial água-estufa, (%)				
partículas afetadas (%)	NBR 12696/92	4,10	-	-
massa perdida (%)		1,90	-	-
Ciclagem natural, (%)				
partículas afetadas (%)	NBR 12695/92	2,00	-	-
massa perdida (%)		1,70	-	-
Sanidade ao ataque de sulfato de sódio (total)		2,40		
Peneira # 25,00 mm, (%)	ASTM C 88/05	0	< 12%*	Atende
Peneira # 19,00 mm, (%)		0		
Peneira # 9,50 mm, (%)		2,40		
Peneira # 4,75 mm, (%)		0		

* Refere-se à ASTM C33, ** Refere-se à NBR 7211

Tabela 19 - Ensaios de caracterização de agregados – Brita 50 mm

Ensaios	Norma	Resultados	Tolerância	Situação
Módulo de finura	NBR NM 248	8,49	Lim. curvas*	Atende
Teor de material pulverulento, (%)	NBR NM 46	0,40	< 1,00%	Atende
Absorção de água, (%)	NBR NM 30/01	1,20	-	-
Massa específica, (g/cm ³)	NBR NM 52/02	2,98	> 2,80	Atende
Teor de argila em torrões e partículas friáveis, (%)	NBR 7218/87	0	< 0,50	Atende
Índice de forma, método do paquímetro	NBR 7809/83	2,90	<3,00**	Atende
Abrasão Los Angeles, (%)	NBR NM 51/01	10,00	< 50,00	Atende
Ciclagem acelerada com etilenoglicol, (%)	NBR 12697/92	1,40	-	-
Ciclagem artificial água-estufa, (%)				
partículas afetadas (%)	NBR 12696/92	4,10	-	-
massa perdida (%)		1,95	-	-
Ciclagem natural, (%)				
partículas afetadas (%)	NBR 12695/92	8,70	-	-
massa perdida (%)		6,83	-	-
Sanidade ao ataque de sulfato de sódio (total)		0		
Peneira # 50,00 mm, (%)		0		
Peneira # 25,00 mm, (%)	ASTM C 88/05	0	< 12%*	Atende
Peneira # 19,00 mm, (%)		0		
Peneira # 9,50 mm, (%)		0		
Peneira # 4,75 mm, (%)		0		

* Refere-se à ASTM C33, ** Refere-se à NBR 7211

A granulometria dos materiais foi verificada, demonstrando bom gradeamento dos mesmos, conforme curva granulométrica apresentada na Figura 19.

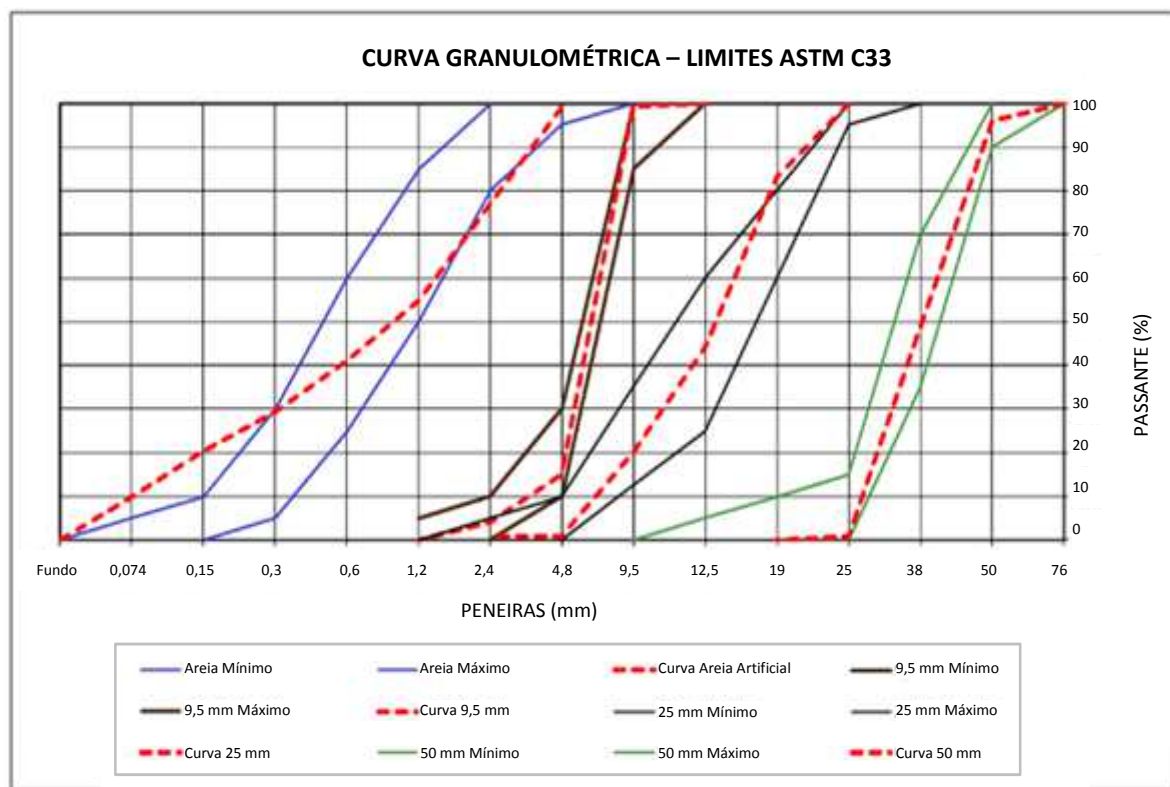


Figura 19 - Curva granulométrica dos agregados - Limites definidos pela norma ASTM C33 para agregado miúdo e agregado graúdo.

A análise petrográfica foi considerada normal para rocha do tipo diabásio, não demonstrando presença significativa de componentes estranhos à natureza da rocha, como sulfatos, nem mesmo outro mineral indicativo associado, conforme mostra a Tabela 20. Além disso, o teor de argilominerais foi baixo.

Com relação à utilização do material como agregado para concreto, a rocha foi classificada como potencialmente suscetível à reatividade álcali-agregado e, de acordo com a NBR 15577:2008, foi verificada a potencialidade da reação e capacidade de mitigação da reação pelo cimento utilizado. O emprego do cimento CPIV-32 possibilita o uso dos agregados mencionados visto que pode mitigar a tendência a RAA.

Tabela 20 - Análise petrográfica do diabásio

Características		Brita 25 mm	Brita 50 mm
Tipo da amostra	Cor	Cinza escuro	Cinza escuro
	Estrutura	Maciça	Maciça
Composição mineralógica	Andesina Labradorita (%)	55 a 60	55 a 60
	Augita (%)	30 a 35	30 a 35
	Minerais opacos (%)	5	5
	Apatita	< 1	< 1
	Feldspato alcalino (%)	< 1	< 1
	Argilomineral (%)	1 a 2	1 a 2
	Quartzo microgranular (%)	< 1	< 1
Classificação da rocha	Tipo de rocha	Ígnea	Ígnea
	Nome	Microgabro – diabásio	Microgabro – diabásio
Reatividade potencial álcali-agregado	Potencial reativo	Potencialmente reativo	Potencialmente reativo

Para chegar a essa conclusão, foram realizados ensaios de expansão em barras de argamassa cujos resultados estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Determinação da expansão em barras de argamassa utilizando cimento padrão e cimento CPIV-32

	Ensaio com cimento padrão			Ensaio com cimento CP IV-32		
	Expansão 14 dias	Expansão 30 dias	Situação	Expansão 14 dias	Expansão 30 dias	Situação
Areia artificial	0,089	0,352	Pot. Reativo	0,028	0,074	Mitigou a reação
Pedrisco	0,105	0,322	Pot. Reativo	0,026	0,025	Mitigou a reação
Brita 25 mm	0,101	0,398	Pot. Reativo	0,053	0,091	Mitigou a reação
Brita 50 mm	0,083	0,251	Pot. Reativo	0,028	0,071	Mitigou a reação
Referência	NBR 7211	NBR 15.577/08	-	NBR 15.577/08	NBR 15.577/08	-
Limite	< 0,100	< 0,190		< 0,100	< 0,190	

Dados os resultados, foi feita a comparação entre a expansibilidade apresentada pelas barras de argamassa moldadas com o cimento padrão e as moldadas com o cimento CPIV-32, conforme é possível verificar nos gráficos (Figura 20 e Figura 21).

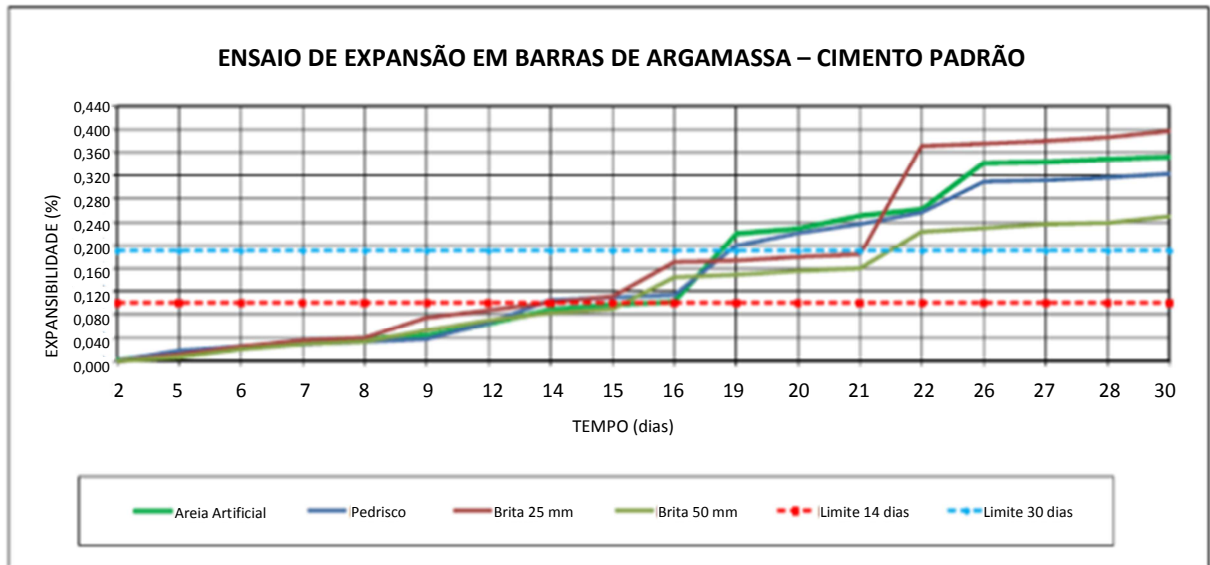


Figura 20 - Gráfico Expansibilidade x Tempo - Ensaio de expansão em barras de argamassa com cimento padrão

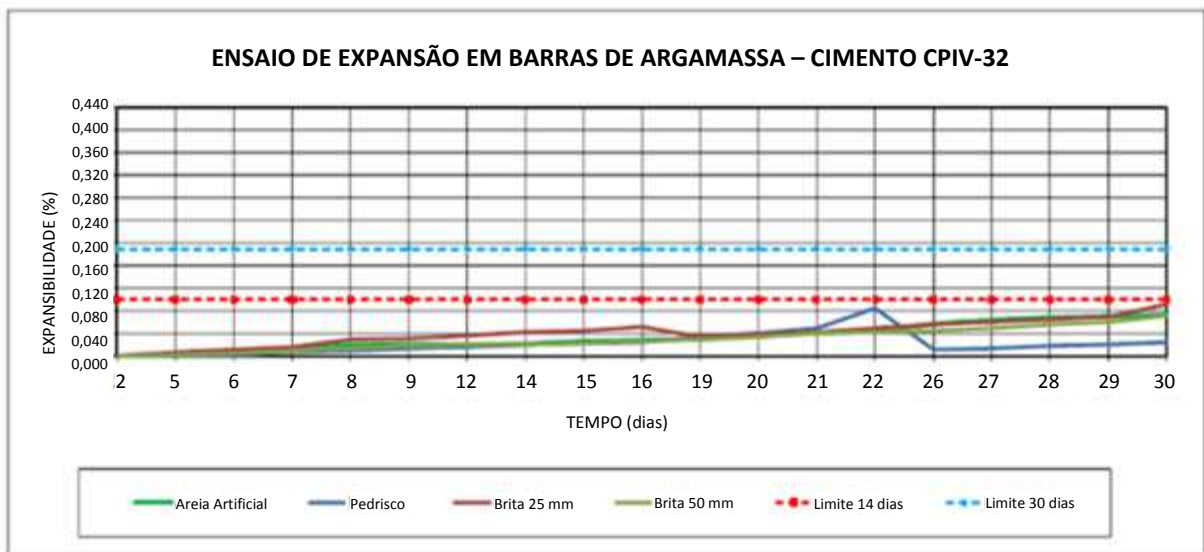


Figura 21 - Gráfico Expansibilidade x Tempo - Ensaio de expansão em barras de argamassa com cimento CPIV-32

Os resultados das análises realizadas apresentaram-se dentro dos limites especificados nas normas brasileiras correspondentes, apesar das manchas evidenciadas.

5.2 Resistência à compressão

Os ensaios de determinação de resistência à compressão axial foram realizados segundo as diretrizes da NBR 5739:2007, utilizando uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL 30.000 para 30 tf, devidamente calibrada.

Os CP's moldados, referentes ao traço CCR 01, submetidos ao ensaio de resistência à compressão apresentaram os resultados demonstrados na Figura 22. Os resultados estão apresentados no Anexo C.

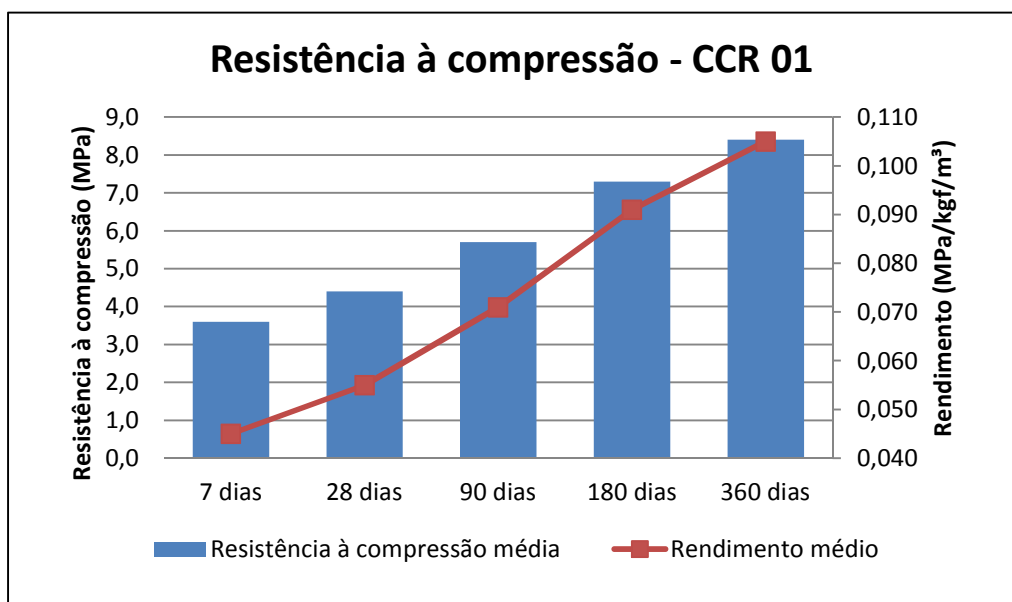


Figura 22 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão – CCR 01

Os resultados dos ensaios realizados com os CP's referentes ao traço CCR 02 estão ilustrados na Figura 23.

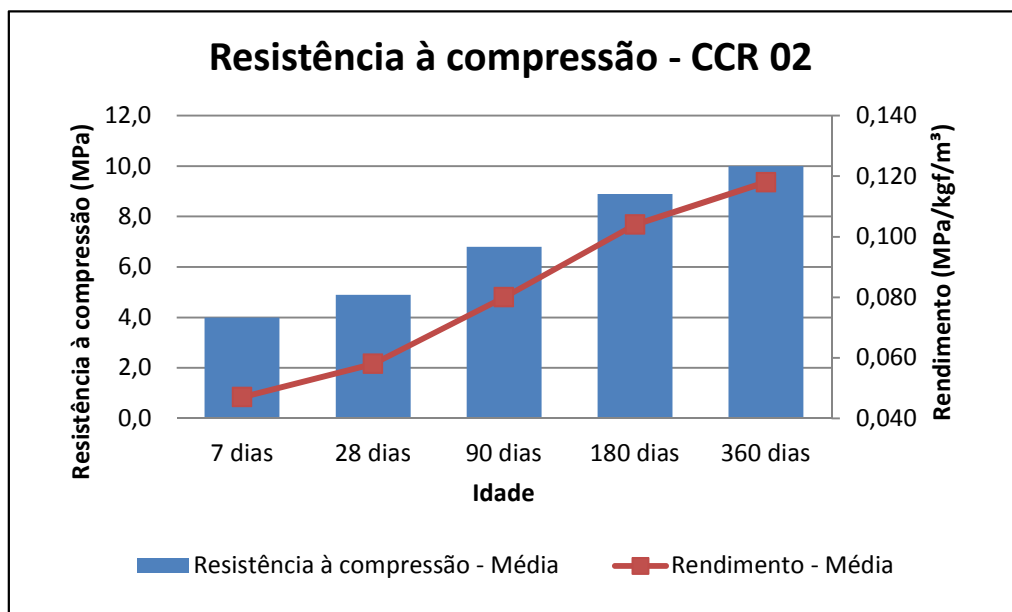


Figura 23 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão – CCR 02

Observou-se que a resistência mecânica à compressão foi compatível com barragens de CCR, ou seja, mesmo com os pontos brancos identificados nos CP's (Figura 24) não houve influência significativa que impossibilitasse a utilização do material em concreto.



Figura 24 – Corpos de prova rompidos apresentando pontos brancos.

Apesar de os valores da resistência final do CCR terem se mostrado satisfatórios, foi detectada a sua baixa evolução ao longo do tempo comparativamente aos dados de barragens de CCR de outras regiões, conforme mostra a Tabela 22.

Tabela 22 - Comparativo de rendimento médio entre os dados deste estudo e de obras em CCR em outras regiões.

Nome da obra	Local da Obra	Consumo médio de cimento (kg/m³)	Tipo de rocha	Rendimento médio (MPa/kg/m³)	
				180 dias	360 dias
UHE 14 de Julho	Cotiporã - RS	80	Basalto	0,14	Não disponível
PCH Angelina	Major Gercino - SC	80	Granito	0,09	0,12
PCH Santa Luzia	São Domingos - SC	80	Riodacito	0,12	Não disponível
Dados deste estudo	Região mediana do rio Tibagi - PR	80	Diabásio	0,09	0,1

Para verificar as causas do baixo rendimento do concreto em estudo, foram realizados ensaios e análises dos materiais constituintes que serão apresentados a seguir.

5.3 Verificação da influência dos materiais na evolução da resistência à compressão

Com a intenção de determinar se a possível contaminação dos agregados consistiu no principal fator responsável pela baixa evolução da resistência do CCR, foram realizados ensaios com todos os materiais utilizados para a confecção do concreto em estudo.

5.3.1 Cimento

Na Figura 25, estão apresentados os resultados obtidos, variando-se a marca do cimento, porém mantendo-se os demais insumos (água, aditivo, agregados). Foram utilizados dois tipos de cimento considerados comuns em Curitiba e região metropolitana e o traço adotado foi o CCR 01.

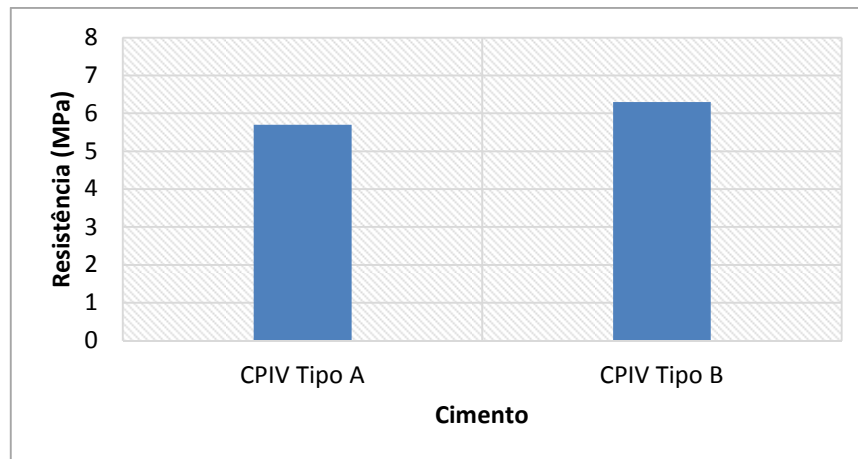


Figura 25 - Comparativo de resistências aos 180 dias entre o cimento CPIV Tipo A (utilizado no CCR em estudo) e o CPIV Tipo B

A partir desta análise foi possível concluir que mesmo alterando o cimento, a evolução da resistência ainda foi baixa, já que, aos 180 dias, a resistência à compressão axial de 7 MPa não foi atingida. Isso demonstrou que o cimento não foi o fator responsável pelo efeito em questão.

5.3.2 Água

Na Figura 26, pode-se visualizar que a alteração da fonte de água de amassamento não interferiu na evolução da resistência do CCR, pois o efeito relativo à baixa evolução do concreto permaneceu. Foi utilizado o traço CCR 02.

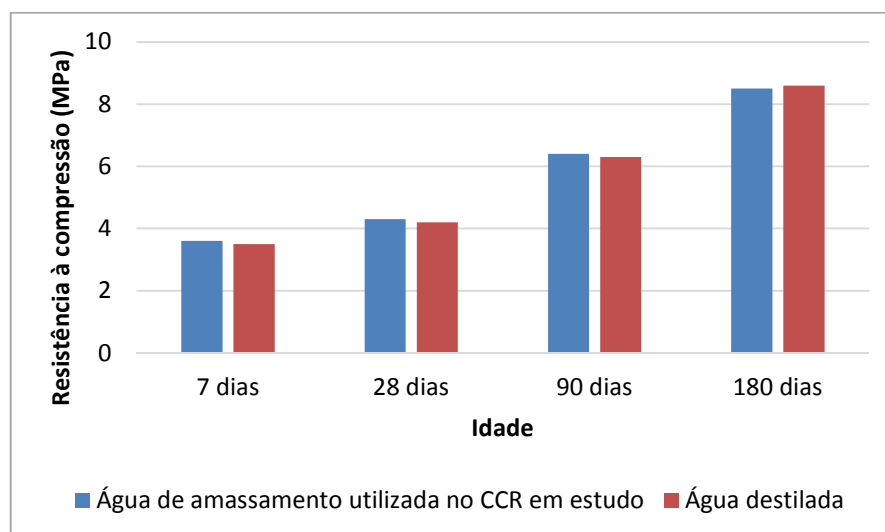


Figura 26 - Comparativo de evolução das resistências à compressão dos CP's moldados com água de amassamento padrão (do rio) e CP's moldados com água destilada

Sendo assim, pode-se descartar a influência da água como sendo fator responsável pela baixa evolução da resistência do CCR em estudo.

5.3.3 Aditivo

A influência do aditivo, verificada a partir da realização do ensaio comparativo entre CP's moldados com aditivo utilizado neste estudo, e CP's sem aditivo, foi descartada devido aos resultados que estão apresentados na Figura 27.

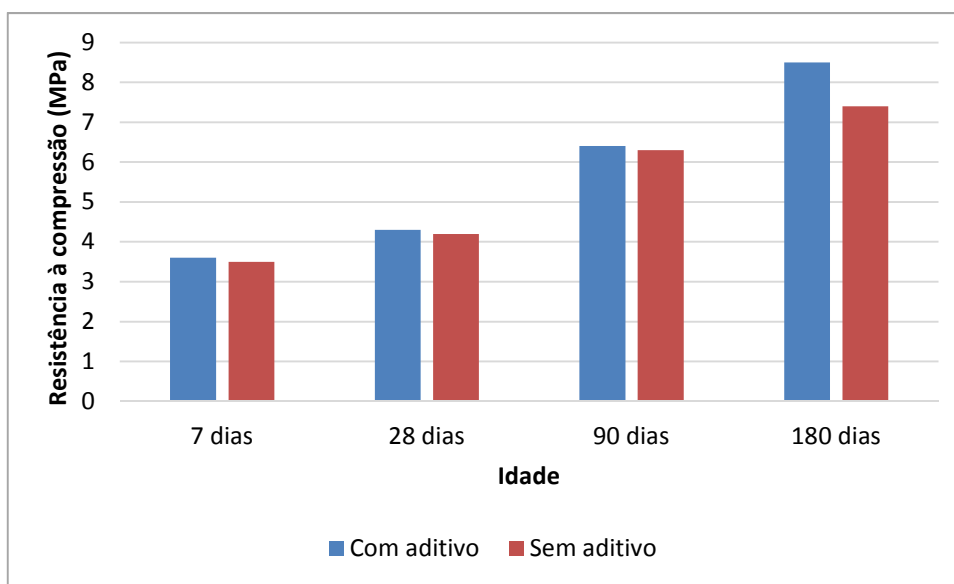


Figura 27 - Comparativo de evolução das resistências à compressão dos CP's moldados com aditivo e CP's sem aditivo

Da mesma forma que o cimento e a água, a alteração do traço contendo aditivo não impediu que o efeito no retardo da evolução da resistência acontecesse. Ainda, foi possível verificar o efeito favorável do uso do aditivo aos 180 dias.

Como no item anterior, foi utilizado o traço CCR 02.

5.3.4 Agregados

Conforme visualizado na Figura 28, foi possível verificar um contraste entre a evolução da resistência apresentada pelos CP's com agregados provenientes da pedreira em estudo e a resistência apresentada pelos CP's com os agregados usados na PCH Moinho (utilizando-se o mesmo traço). Os resultados inferiram que

os agregados tiveram influência no efeito observado com relação ao baixo rendimento do concreto.

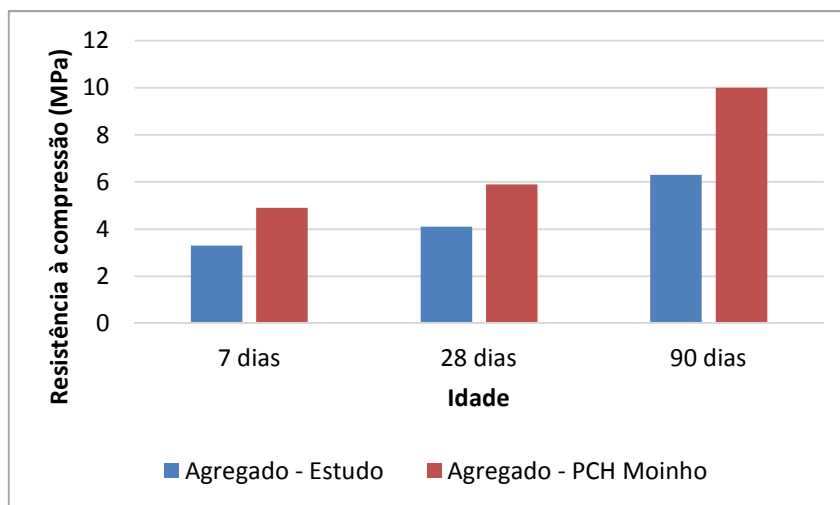


Figura 28 - Comparativo de evolução das resistências à compressão dos CP's moldados com variação do tipo de agregado

Para reforçar a análise feita, foi realizado um novo ensaio comparativo. Neste ensaio foram moldados CP's com o traço utilizado neste estudo e outros com traço deste estudo mas com agregados e água de amassamento utilizados na obra da PCH Santa Luzia. Esta comparação pode ser observada na Figura 29. Em ambos os ensaios comparativos foi utilizado o traço CCR 02.

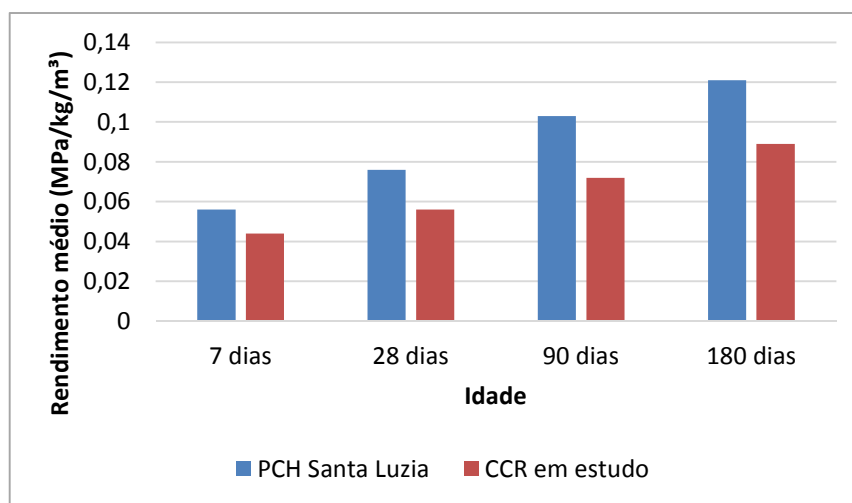


Figura 29 - Comparativo de rendimentos entre CP's com traço deste estudo e CP's com traço similar, utilizando agregados e água de amassamento da PCH Santa Luzia

Constatou-se, portanto, que houve uma diferença significativa entre os resultados obtidos usando os agregados deste estudo e outros agregados. Isso levou à inferência de que houve influência do agregado proveniente da pedreira em questão nos efeitos observados em relação ao ganho de resistência do concreto. Como os teores de sulfatos analisados na fase de dosagem do CCR estavam dentro dos limites estabelecidos pelas respectivas normas, foi necessário realizar a investigação por meio de ensaios não previstos em norma.

5.4 Verificação dos teores de sulfetos e sulfatos

Verificada a influência dos agregados na baixa evolução da resistência dos corpos de prova, foram coletadas amostras da pedreira e utilizados alguns CP's para a realização de outros tipos de ensaio, como será verificado nos itens a seguir.

5.4.1 Análise microestrutural do concreto – MEV e DRX

As análises microestruturais realizadas nesta etapa do estudo envolveram as técnicas de MEV e DRX.

Durante as inspeções visuais realizadas previamente às análises pelo MEV, foi detectada uma grande concentração de deposições brancas ao longo de toda a amostra investigada. Estas deposições se encontravam na amostra como um todo (Figura 30), em poros, nas regiões de descolamento dos agregados (Figura 31), na pasta, e sobre os agregados.



Figura 30 - Material esbranquiçado disperso em toda a amostra



Figura 31 - Detalhe da interface entre agregado e pasta

Nas imagens obtidas por MEV foram observadas características como as superfícies dos agregados contaminadas por produtos aciculares formados tardiamente e a pasta com considerável incidência de fases aciculares variadas.

As características observadas foram associadas às regiões identificadas anteriormente na inspeção visual a olho nu e por MO com material esbranquiçado.

Foram, também, observados produtos típicos de carbonatação da amostra. Os produtos observados parecem estar associados a compostos contendo enxofre sugestivos da etringita (trissulfoaluminato de cálcio hidratado).

Os cristais de etringita aglomeram-se recobrendo porções de argamassa em especial das superfícies de descolamento do agregado graúdo. Esses cristais deram origem a tufo de cristais fibrorradiados no interior dos poros, fixando-se nas paredes destes, podendo eventualmente preenchê-los totalmente. Nas figuras a seguir (da Figura 32 à Figura 40) estão mostradas as imagens obtidas pelo MEV e espectros EDX das respectivas regiões de análise.

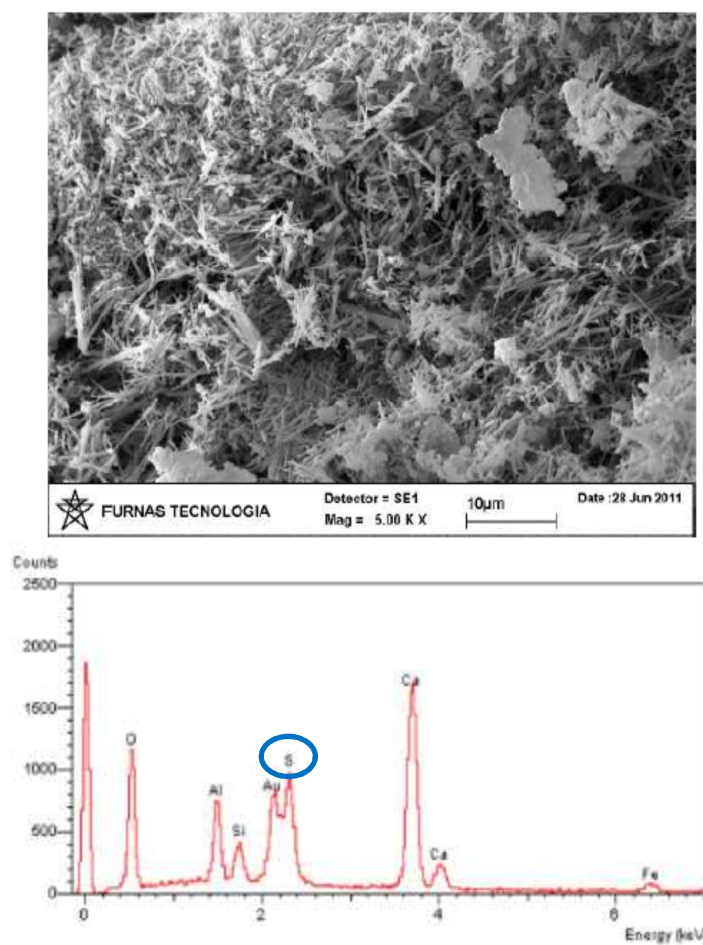


Figura 32 - Detalhe das acículas na pasta em ponto esbranquiçado observado na inspeção visual e gráfico de EDX, com destaque para a presença de enxofre.

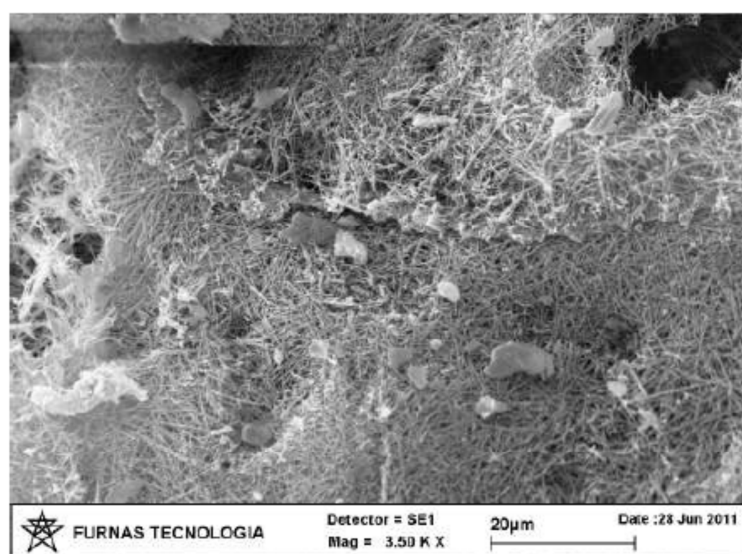


Figura 33 - Deposições aciculares sobre o agregado

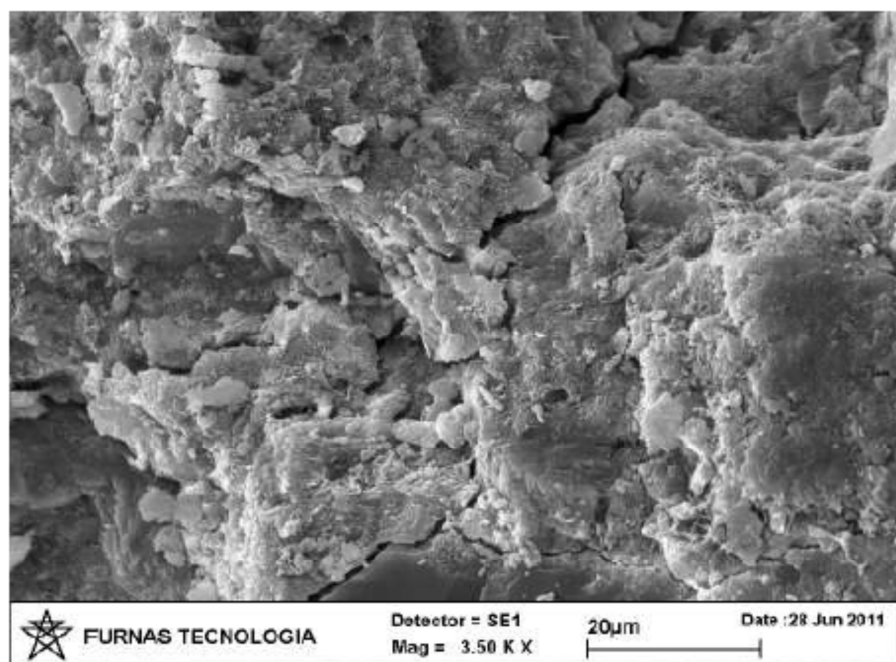


Figura 34 - Agregado fragmentado próximo de região com grande concentração de acículas sulfatadas

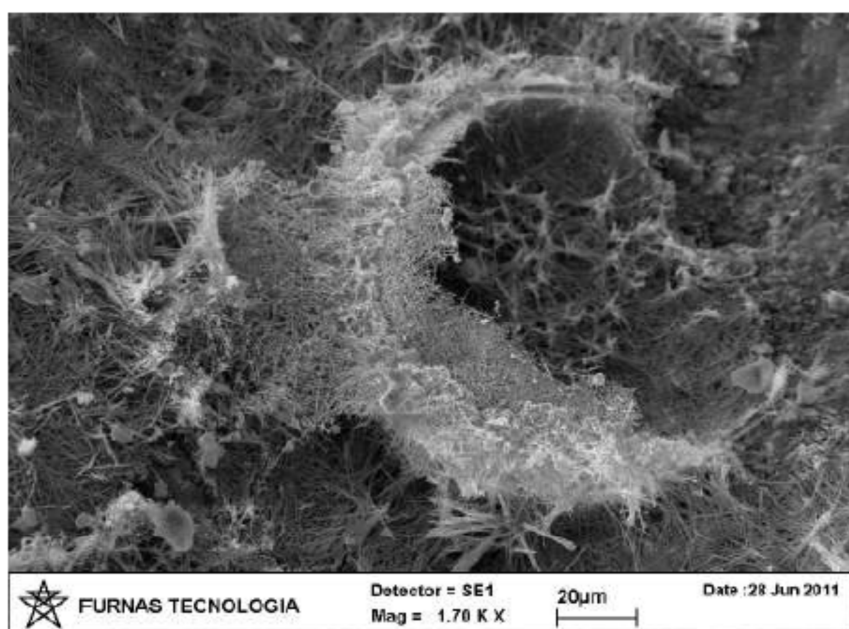


Figura 35 - Região da pasta com agrupamentos aciculares contendo enxofre

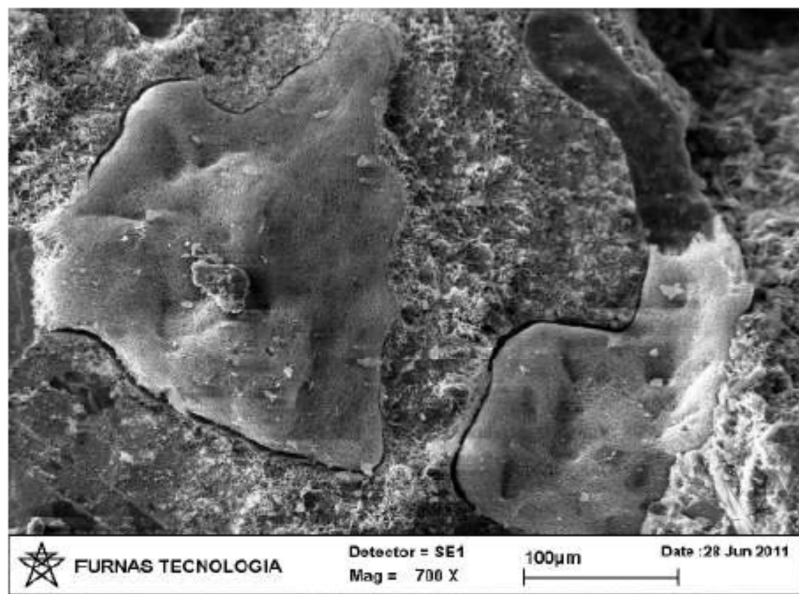


Figura 36 - Regiões com aglomerados de produtos aciculares sobre o agregado

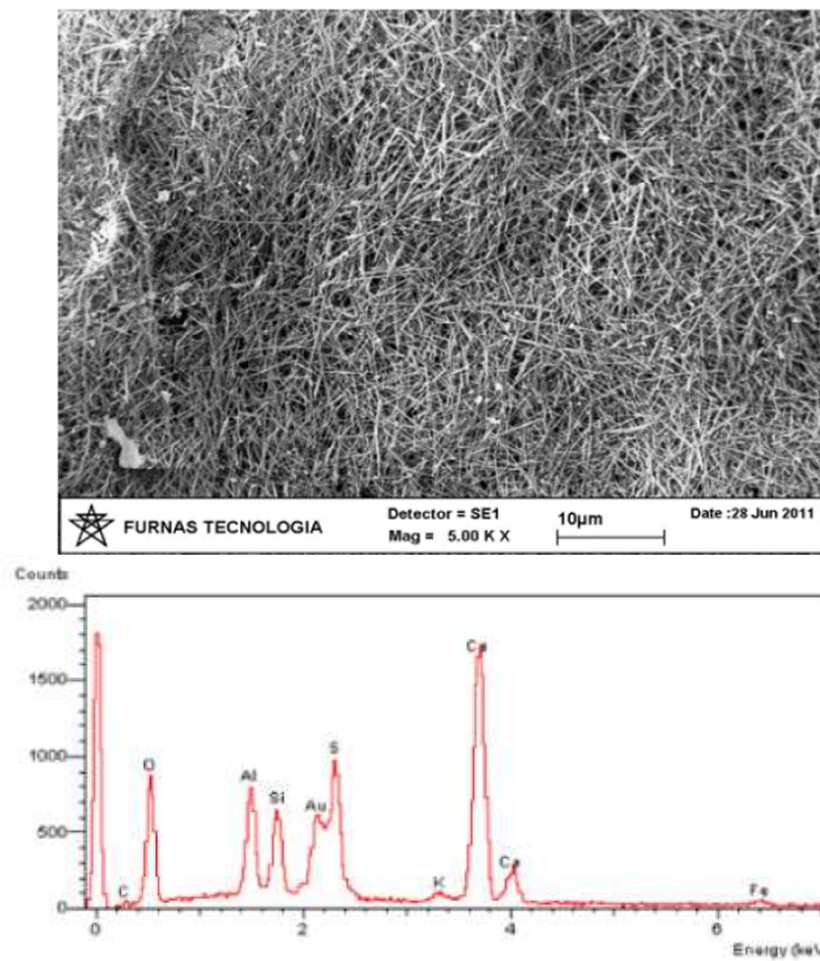


Figura 37 - Detalhe das acículas presentes nas aglomerações da Figura 33 sugestivo de etringita e/ou taumasita e o respectivo espectro EDS

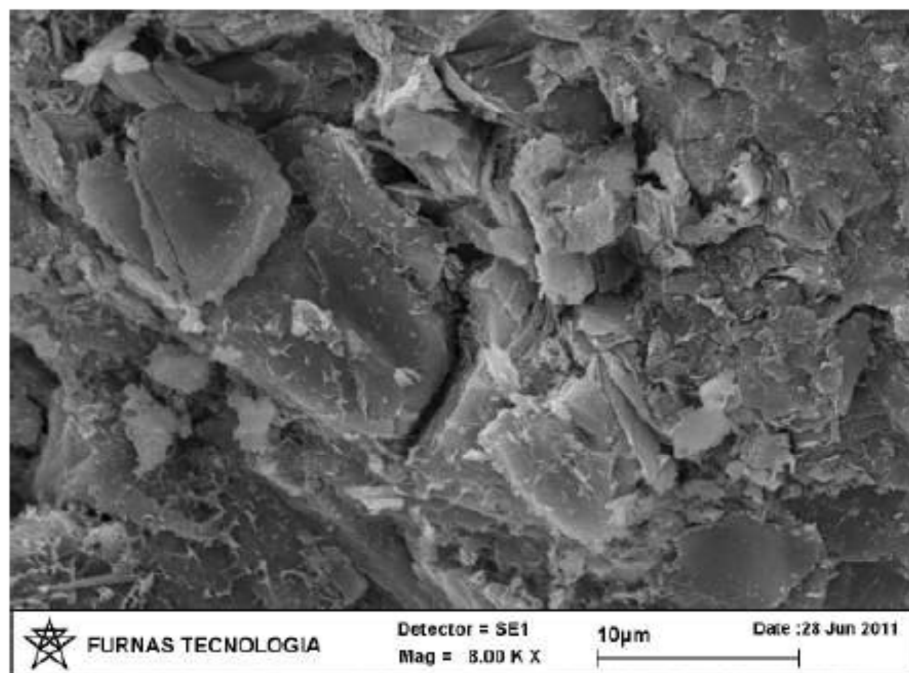


Figura 38 - Agregado totalmente fragmentado

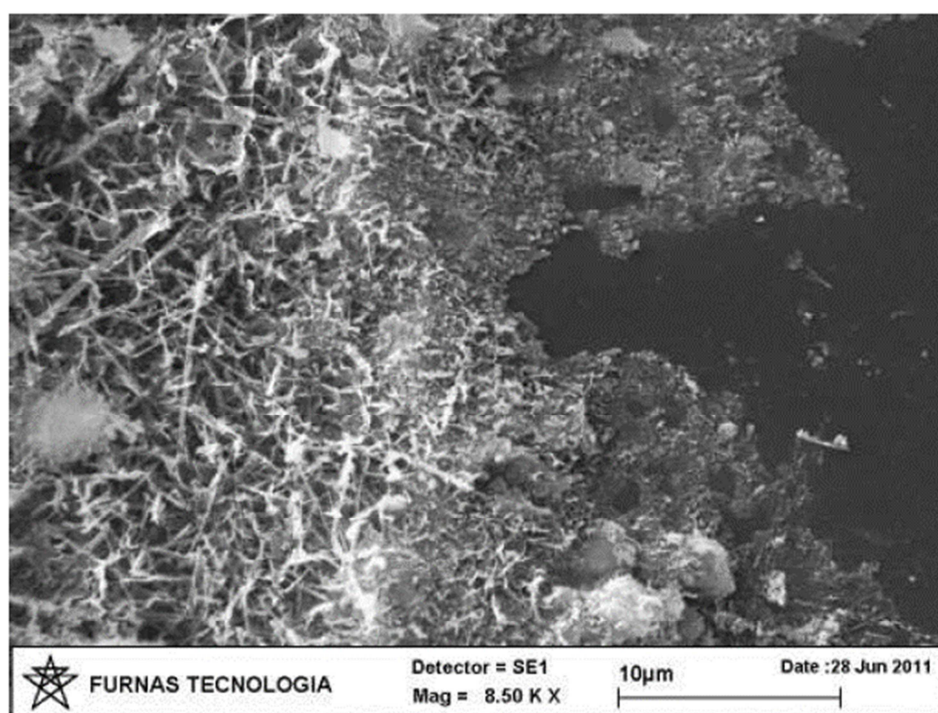


Figura 39 - Interface do agregado com formações aciculares

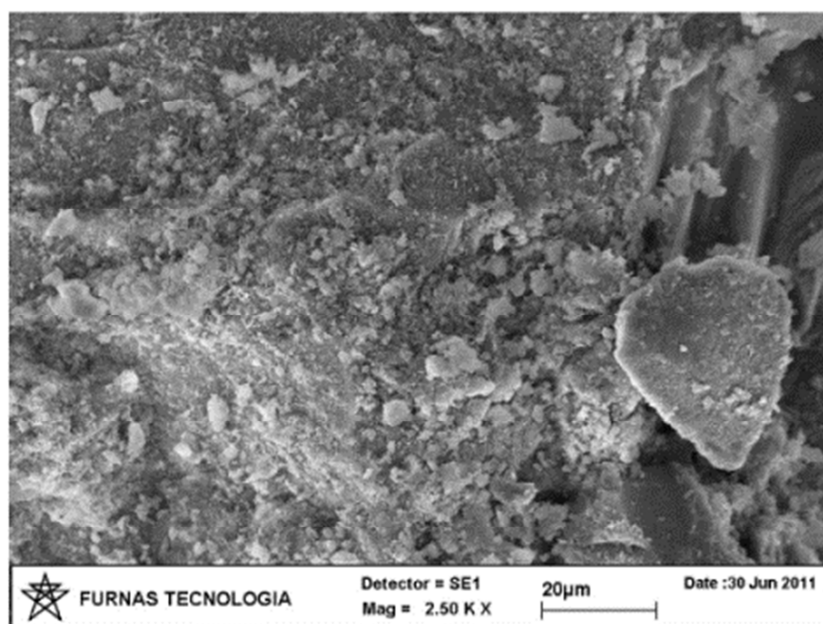


Figura 40 - Pulverulência importante na amostra

Nos gráficos de EDS foi possível observar a composição aproximada dos cristais de etringita. A presença de ouro (Au) deve-se somente aos processos de preparação das amostras.

Sendo assim, considerando a morfologia e a composição química analisados pelo MEV e pela espectrometria de EDS, a maior probabilidade é de que os cristais evidenciados nesta análise sejam de etringita.

É provável que a etringita em questão tenha sido formada em função da presença de sulfatos que, em contato com a água, cristalizam nesta forma tanto nos poros quanto na interface entre agregado e pasta, dando origem ao que também é conhecido como etringita tardia (visto que foram verificados indícios de expansão nas imagens obtidas através do MEV).

Foram analisadas ainda amostras de areia, britas e agregados graúdos obtidos do interior dos CP's por DRX, com objetivo de investigar os constituintes mineralógicos presentes nos materiais. Na Tabela 23 estão apresentados os resultados obtidos.

Tabela 23 – Compostos mineralógicos identificados por DRX

Material	Pl	Px	Mc	Mu		Q	Il	Hm	Mg	Anf.	Rg	Outro
				Não exp.	Exp.							
Pulverulento R1	P	S	S	T	S	T	T	T	-	-	-	HSF – T
Pulverulento R2	P	T	S	-	T	S	S	S	-	-	-	Cau -T
Areia R1	P	S	S	T	S	T	T	T	T	-	-	-
Areia R2	P	S	S	-	T	S	S	S	S	T	-	Cau -T
Brita 1 R1	P	S	S	T	S	T	T	T	-	T	T	-
Brita 2 R1	P	S	S	T	S	T	T	T	-	T	-	-
Agregado CP - Amostra 1	P	S	S	S	S	T	T	T	T	T	T	E – T
Agregado CP - Amostra 2	P	S	S	S	S	T	T	T	T	-	-	-

Legenda de incidência: P - Principal; S - Subordinada; T – Traço

Legenda de minerais: Pl - Plagioclásio; Px - Piroxênio; Mc - Microclínio; Mn - Montmorilonita; Não exp. - Não expansiva; Exp. - Expansiva; Q - Quartzo; Il - Ilmenita; Hm - Hematita; Mg - Magnetita; Anf - Anfibólio (pargasita); Rg - Redgilita; HSF - Hidroxissulfato de ferro; Cau - Caulinita; Goe - Goetita; F-Al,K - Fosfato de alumínio e potássio; E - Etringita; R1 - Primeira remessa; R2 - Segunda remessa)

5.4.2 Análise do material pulverulento

Visto que os agregados já haviam sido analisados com relação à presença de sulfatos, verificou-se a importância de analisar especificamente o material pulverulento, já que nem as normas nacionais nem internacionais preveem limites para esta fração de material. É importante ressaltar que o material pulverulento não é considerado agregado e sim apenas porção de areia, que é classificada como agregado. Devido a este fato, não existem ensaios específicos para a porção de material pulverulento.

A preocupação com a finura do material já havia sido apontada por Gomides em 2009, conforme apresentado no item 2.6.

Como na confecção do CCR deste estudo foi utilizada uma quantidade considerável de material pulverulento, com a intenção de preencher os vazios, os resultados obtidos das análises poderiam ser bastante significativos para a pesquisa.

Inicialmente, optou-se pela quantificação do teor de sulfatos no material pulverulento, conforme apresentado na Tabela 24:

Tabela 24 - Verificação dos teores de cloretos, sais e sulfatos na areia artificial e no material pulverulento

	Material pulverulento	Areia artificial
Sais solúveis	1,22%	0,46%
Sulfatos solúveis	0,58%	0,08%
Cloretos	0,006%	0,006%

Visto que o limite para o teor de sulfatos na areia artificial determinado por norma é de 0,1%, o teor encontrado neste ensaio encontra-se dentro do previsto. No entanto, é preciso ter em vista que o teor de material pulverulento na areia artificial é de cerca de 15%, então pode-se verificar que praticamente todo o sulfato presente na areia é proveniente da porção passante na peneira #200 (0,075mm).

Ainda que o teor de sulfatos na areia artificial tivesse ultrapassado o limite estabelecido, a norma permite a sua utilização caso a soma dos teores presentes nos componentes do concreto (água, agregados, cimento, adições e aditivos químicos) não exceda 0,2%.

No caso deste trabalho, o resultado também atendeu a norma, como é possível verificar na Tabela 25.

Tabela 25 - Teor total de sulfatos solúveis no concreto em estudo

Componente		% em peso	Teor de sulfatos (em peso)	Teor de sulfatos solúveis (%)
Cimento	85	3,14	2,6	0,082
Água	125	4,61	0	0,000
Areia artificial	1271	46,90	0,25	0,117
Brita 25 mm	614	22,66	0	0,000
Brita 50 mm	614	22,66	0	0,000
Aditivo plastificante	1,02	0,04	0	0,000
Total	2710	100	2,85	0,198

Ainda para análise do material pulverulento foi realizado o ensaio por DRX visando identificar as fases cristalinas presentes. De acordo com o difratograma obtido, pode-se dizer que o principal constituinte da amostra analisada é a calcita (carbonato de cálcio), contendo subordinadamente o quartzo, sendo também detectada a fase siderita (carbonato de ferro) em traços.

5.4.3 Teor total de enxofre

Para verificar o teor total de enxofre, na forma de sulfetos e sulfatos, tanto na areia artificial quanto no material pulverulento foram realizadas análises químicas que resultaram nos valores apresentados na Tabela 26:

Tabela 26 - Teor de enxofre sob a forma de sulfetos e sulfatos na areia artificial e no material pulverulento

Amostra	Teor de enxofre (%)		
	S Sulfatos	S Sulfetos	S Total
R1 Material pulverulento	0,03	0,17	0,20
Areia	0	0,22	0,22
R2 Material pulverulento	0,14	0,37	0,51
Areia	0,08	0,27	0,35

Na Figura 41 é possível verificar mais uma vez que o teor de enxofre no material pulverulento é significativo e deve ser levado em consideração em estruturas de CCR.

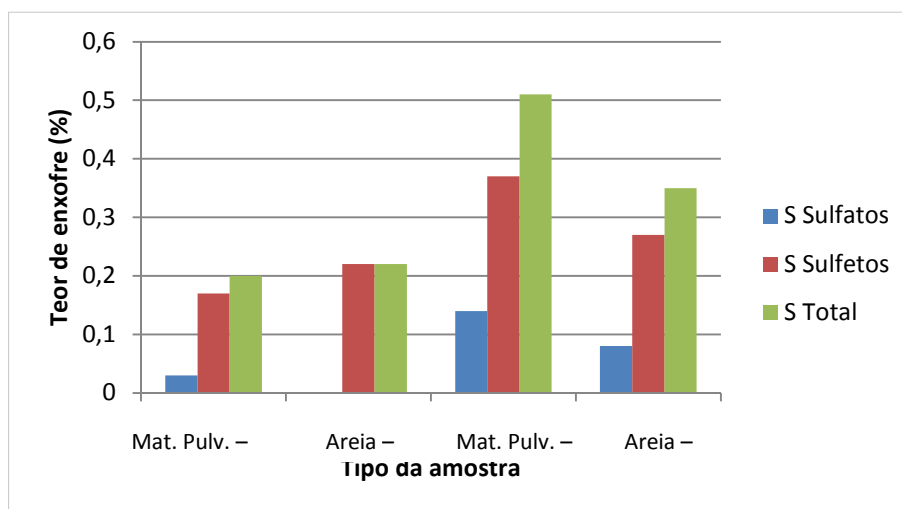


Figura 41 - Comparação dos teores de enxofre detectados nas amostras da primeira e da segunda remessa para areia e material pulverulento

A proporção entre as formas de enxofre determinadas nos materiais está representada na Figura 42. Com base nos resultados obtidos, observaram-se maiores teores de enxofre na forma de sulfetos para todas as amostras verificadas nesta etapa.

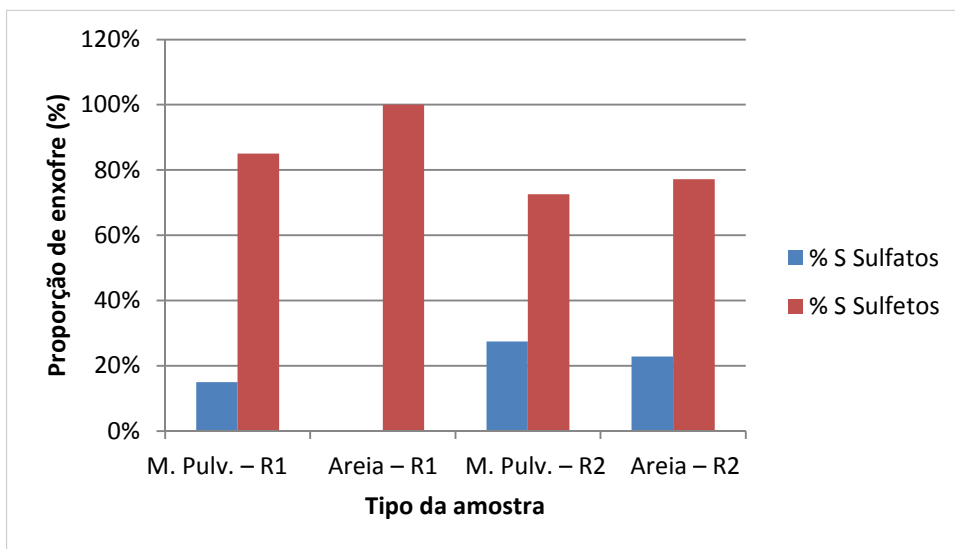


Figura 42 - Proporção entre as formas de enxofre determinadas

Na Figura 43, estão apresentados os teores de SO_3 calculados a partir dos teores de enxofre determinados:

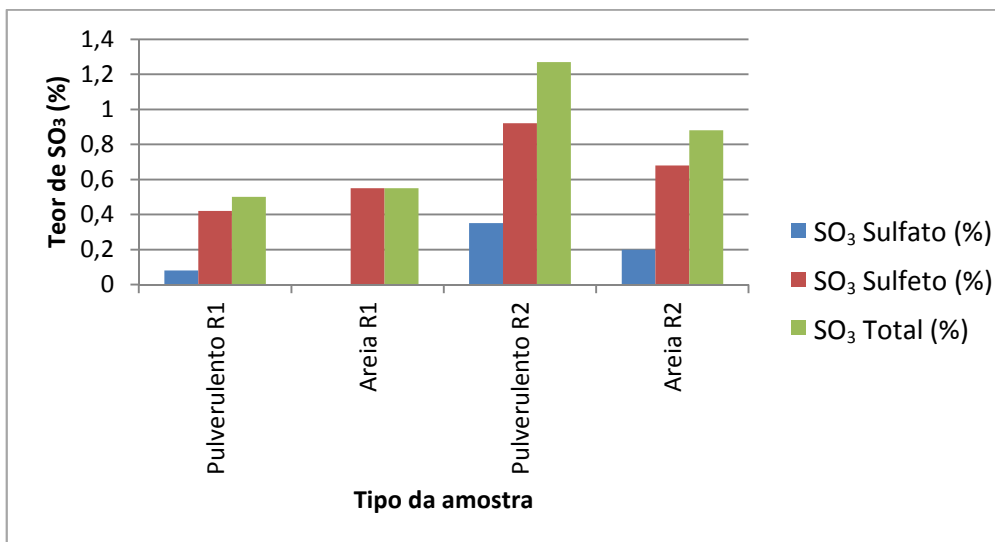


Figura 43 - Teores de SO_3

De acordo com os resultados apresentados, os teores de SO_3 mostraram-se variados entre as amostras, predominando os do tipo sulfetos e chegando a valores

relativamente elevados para as amostras da segunda remessa, em aproximadamente 1,3% e 0,9% para material pulverulento e areia, respectivamente, para o SO₃ total.

Ainda, foram verificados os teores de sulfetos e sulfatos em 30 amostras de concreto, bem como as possíveis fases relacionadas por DRX. Os resultados estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Teores de SO₃ sob a forma de sulfetos e sulfatos e fases por difração de raios X

Amostra	SO ₃ (%)			Possível fase associada por DRX
	Sulfatos	Sulfetos	Total	
1	0,40	0,30	0,70	ND
2	0,28	0,38	0,66	ND
3	0,25	0,48	0,73	K; Te; Mi; E; T
4	0,20	0,40	0,60	ND
5	0,18	0,43	0,61	K; Te; Mi; E; T
6	0,20	0,40	0,60	ND
7	0,23	0,53	0,76	ND
8	0,20	0,43	0,63	ND
9	0,20	0,40	0,60	M; T
10	0,23	0,25	0,48	K
11	0,28	0,30	0,58	M; K
12	0,25	0,20	0,45	K; L; E
13	0,18	0,30	0,48	K
14	0,25	0,30	0,55	K; Te; HSM; M
15	0,20	0,03	0,23	Mi; L; HSM
16	0,23	0,05	0,28	K; L; HSM
17	0,25	0,48	0,73	K
18	0,23	0,03	0,26	HSF; L; HSM; E
19	0,18	0,03	0,21	ND
20	0,33	0,05	0,38	K
21	0,13	0,30	0,43	K; G
22	0,30	0,38	0,68	E
23	0,30	0,18	0,48	Te; L
24	0,43	0,05	0,48	Te; L
25	0,50	0,25	0,75	Te; L; G
26	0,30	0,13	0,43	K; E
27	0,08	0,23	0,31	K
28	0,03	0,15	0,18	ND
29	0,00	0,43	0,43	ND
30	0,10	0,25	0,35	K

Legenda: ND - Não detectada possível fase associada; K - K₂SO₄; Te - Tenardita (Na₂SO₄); Mi - Mirabilita (Na₂SO₄.10H₂O); G - Gipsita (CaSO₄.2H₂O); E - Etringita; T - Taumasita; M - Monossulfato; HSF - Hidroxissulfato de ferro; HSM - Hidroxissulfato de magnésio hidratado;

Assim, foi possível verificar uma grande variedade de possíveis fases associadas contendo enxofre nas amostras analisadas.

5.4.4 Análise por MO

As análises realizadas por microscopia ótica de luz transmitida foram realizadas a partir de amostras de agregado e possibilitaram a sua classificação de origem, identificação de seus constituintes mineralógicos e permitiram a verificação de minerais potencialmente reativos do ponto de vista da reação álcali-agregado.

Constatou-se que os agregados são de natureza ígnea, sendo classificados como diabásio. Sua constituição é principalmente de feldspatos e piroxênios. Com relação à potencialidade reativa para RAA, não foram verificadas características relevantes.

A análise por microscopia ótica de luz refletida possibilitou a identificação de minerais opacos, mais especificamente os sulfetos presentes nestes opacos. Dentre os sulfetos verificados por meio da análise qualitativa nas amostras dos agregados destacaram-se: pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), pirrotita (Fe_{1-x}S) e esfalerita (ZnS).

Da análise semiquantitativa realizada nas amostras dos agregados foram detectados teores de sulfetos inferiores a 0,5%, conforme mostrado na Tabela 28.

Tabela 28 - Sulfetos presentes nas amostras analisadas por microscopia ótica de luz refletida e seu grau de alteração

Amostra	% Total de Sulfetos	Alteração
Pulverulento	< 0,5	Baixa alteração da pirrotita para limonita
Areia	< 0,5	inalterados
Brita 1	<< 0,5	inalterados
Brita 2	<< 0,5	inalterados
CP de CCR - Amostra 1	<<< 0,5	inalterados
CP de CCR - Amostra 2	<<< 0,5	inalterados

Conforme os resultados obtidos quanto à alteração, foi possível verificar que os sulfetos encontram-se preservados na maioria das amostras analisadas, exceto pela amostra de material pulverulento, embora em baixo grau de alteração.

Este fato poderia ser justificado pela superfície específica dos grãos do material pulverulento, que é maior, tornando-o mais suscetível a reações químicas (MARQUES FILHO, 2005).

5.5 Comparativo entre resultados obtidos

Após análises feitas tanto nos ensaios de caracterização quanto nos ensaios complementares, foi possível verificar que os requisitos foram atendidos nos casos em que as normas dispunham de limites como parâmetros de comparação. Em outros casos não foi possível realizar um comparativo com os resultados devido à ausência de normas no âmbito nacional e internacional, conforme pode ser observado na Tabela 29.

Tabela 29 – Comparativo entre teores de enxofre obtidos através dos ensaios e os limites de norma

Ensaio		Quesito	Limite		Resultado obtido
Norma	Nome		Norma	Valor	
NBR 9917	Determinação de sulfatos solúveis	Teor de sulfatos solúveis na areia artificial	NBR 7211	< 0,1%	0,08%
NBR 9917	Determinação de sulfatos solúveis	Teor total de sulfatos solúveis no concreto	NBR 7212	< 0,2%	0,198%
-	Análise química de enxofre	Teor total de SO ₃ no material pulverulento	Não há limite		1,30%
-	Análise química de enxofre	Teor total de SO ₃ na areia artificial	Não há limite		0,90%

5.6 Comparativo entre teores de sulfetos e sulfatos para CCV e CCR

Visando demonstrar a importância do estabelecimento de parâmetros diferenciados para CCV e CCR com relação aos teores de sulfetos e sulfatos, foram feitas análises que estão demonstradas na Tabela 30.

Para manter a coerência de resultados, foi utilizada uma das dosagens de concreto convencional da UHE Mauá.

Tabela 30 – Comparativo das características do CCR e do CCV

	CCR 01	CCV
Consumo de cimento (kg/m ³)	80	360
%RI CPIV – 32	30	30
%RS CPIV – 32	70	70
Clinker (kg)	56	252
Areia artificial (kg/m ³)	1254	960
Brita (kg/m ³)	1222	954
Total agregado (kg/m ³)	2476	1914
Teor máximo de sulfatos no agregado	4,95	3,83
Relação agregado/aglomerante	30,95	5,32
Relação sulfato/aglomerante	0,0884	0,0152

Sendo assim, foi possível verificar que os teores máximos de sulfatos presentes no agregado permitidos por norma não variam significativamente quando comparados CCR e CCV. No entanto, durante a confecção do CCR é utilizada uma quantidade de clínquer bastante inferior à do CCV, o que o torna mais vulnerável aos efeitos decorrentes de reações químicas. Esse fato pode ser materializado pela relação sulfato/clínquer apresentada, onde é possível verificar um valor bastante superior (cerca de seis vezes maior) para CCR se comparado ao CCV. Como as reações cessam apenas quando não há mais reagentes, é possível que os agentes deletérios passem a consumir outras fases presentes no concreto no caso do CCR, afetando a sua durabilidade.

Por isso, sugere-se que os teores limites estabelecidos nas normas passem a levar em consideração a relação agregado/aglomerante, para evitar a degradação de estruturas com menores consumos de cimento.

5.7 Considerações finais

Após as investigações realizadas, pode-se dizer que é provável que o mecanismo de formação dos minerais pirita e calcita (carbonato de cálcio), encontrados no local de análise da pedreira, esteja associado aos fluxos hidrotermais que foram injetados nas descontinuidades e zonas de falhas principais, impregnando sulfetos nas faces das fraturas que, em alguns locais, foram posteriormente preenchidas por calcita.

O trabalho tornou-se relevante pela inexistência de casos similares em rochas ígneas, conforme verificado no levantamento bibliográfico. Sendo assim, a pesquisa envolvendo como tema a presença de etringita tardia formada a partir da reação de sulfetos e sulfatos presentes no material pulverizado com os demais componentes do concreto compactado com rolo pode ser considerado um caso inédito até então e por isso ainda apresenta diversas possibilidades de estudo.

6 CONCLUSÕES

Neste estudo, foram extraídos agregados de uma pedreira cuja rocha foi classificada como diabásio. No entanto, foram detectadas a deposição de material esbranquiçado e a presença de pontos amarelo dourado em fraturas da rocha.

Foram realizados estudos mediante a utilização dos agregados de uma pedreira que encontra-se na região intermediária do rio Tibagi, no Paraná em traços de concreto compactado com rolo.

Como os resultados dos ensaios de caracterização dos insumos (aditivos, água, cimento e agregados) apresentaram-se dentro dos limites estabelecidos pelas respectivas normas, os mesmos foram utilizados para a moldagem dos CP's de estudo.

Ainda, na etapa de caracterização, o teor de sulfato de sódio total na areia artificial obtido foi de 1,5%, o que representa um percentual bastante baixo se comparado ao limite estabelecido pela ASTM C33, que é de 10%. O teor de sulfatos solúveis no material pulverulento foi de 0,58%, no entanto não há limites de norma para utilizar como parâmetros de comparação.

Para a dosagem do CCR foram utilizados como base os consumos empregados na construção da barragem da UHE Mauá. A escolha dos traços da UHE Mauá para comparação permite a validação externa dos resultados bem como avaliação em situação real. Baseado nisso e em outras obras de CCR, o rendimento esperado aos 360 dias era de 0,12 MPa/kg/cm³. No entanto, após a realização dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova moldados, foi verificada a sua baixa evolução ao longo do tempo, resultando num rendimento médio de 0,09 MPa/kg/cm³. Este resultado não era esperado já que todos os materiais utilizados foram devidamente caracterizados e apresentaram resultados de acordo com o estabelecido pelas respectivas normas.

Os CP's referentes ao traço CCR 01 chegaram a um f_{ck} de 6,1 MPa aos 180 dias, enquanto que o convencional para barragens em CCR é de 7MPa, ou seja, ficou 13% abaixo da resistência padrão para este tipo de obra.

Os ensaios comparativos realizados para determinar qual insumo utilizado para a confecção do concreto era responsável pelo efeito observado demonstraram a influência dos agregados na baixa resistência, pois:

- as resistências apresentadas pelos CP's moldados com o cimento A (padrão deste estudo) e o cimento B não atingiram a resistência mínima esperada para o CCR, cerca de 7 MPa, chegando a 5,8 MPa e 6,2 MPa aos 180 dias, respectivamente;
- a diferença de resistência à compressão dos CP's moldados com água proveniente de diferentes fontes foi de apenas 1%;
- os CP's moldados sem aditivo apresentaram resistências ainda mais baixas do que os CP's com o aditivo deste estudo;
- os CP's moldados com o agregado deste estudo apresentaram resistência à compressão igual a 6,1 MPa, inferior aos CP's com o agregado utilizado na PCH Moinho cuja resistência foi de 10 MPa;
- o rendimento apresentado por CP's com agregados utilizados na PCH Santa Luzia foi de 0,12 MPa/kg/cm³ enquanto que o rendimento dos CP's com os agregados deste estudos foi igual a 0,09MPa/kg/m³.

A análise química de enxofre em amostras de areia artificial e especificamente de material pulverulento, resultou em teores totais de SO₃ de 0,90% e 1,30%, respectivamente. Muito embora não se tenha parâmetros para comparar estes resultados obtidos, é possível concluir a relevância da análise do material pulverulento separadamente, já que devido a sua finura, é mais suscetível a reações químicas.

A realização de ensaios complementares por MEV, DRX, EDS e MO possibilitaram a identificação de produtos aciculares formados tardiamente nas amostras, sugerindo a presença de etringita em decorrência da presença de sulfetos e sulfatos no material pulverulento utilizado.

É importante ressaltar que mesmo que a origem da rocha em estudo não demonstre a possibilidade da presença de produtos deletérios, é necessária a investigação buscando verificar se houve ou não intrusão em alguns locais de outros materiais ao longo do tempo.

A formação de etringita foi potencializada pela concentração de sulfetos e sulfatos no material pulverulento e por esse estudo tratar de CCR, já que a adoção dos limites de norma podem ser inadequados uma vez que a norma indica teores menores de material pulverulento do que os usuais em execução de CCR.

Mesmo com teores de sulfato atendendo os limites preconizados pelas normas, a reação pode ter sido potencializada devido a superfície específica do pó que é maior, ou seja, o pó é mais acessível para a reação. Também, deve ser considerado o menor consumo relativo das dosagens de CCR para barragens em relação ao CCV, que gerará uma relação teor de sulfatos x consumo de aglomerante superior àquela de concretos convencionais. Neste estudo, a diferença entre esta relação para CCR e para CCV foi de, aproximadamente, 82%, sendo que para CCR o valor foi de 0,0884 enquanto que para CCV foi de 0,0152.

A partir das análises realizadas, pode-se constatar que os processos de caracterização da ABNT e da ASTM podem ser ineficazes para os casos em que o material pulverulento encontra-se contaminado pela presença de sulfetos e/ou sulfatos.

Sendo assim, é importante ressaltar a necessidade de que sejam elaboradas normas técnicas que indiquem:

- teor máximo de sulfetos e/ou sulfatos considerando o consumo de cimento utilizado para a confecção do concreto;
- teor máximo de sulfetos e/ou sulfatos presente especificamente no material pulverulento utilizado na composição do concreto;
- teor máximo de sulfetos e/ou sulfatos em CCR, considerando o elevado consumo de cimento.

No caso de uma estrutura que utilize o CCR nas mesmas condições apresentadas neste trabalho, é importante a realização de métodos buscando impedir o contato da estrutura com a água, evitando assim a ocorrência das reações expansivas no seu interior.

Embora a evolução da resistência à compressão do CCR tenha sido afetada pela presença de sulfetos e sulfatos, os valores de resistência final foram satisfatórios, demonstrando que este concreto pode ser utilizado em obra, tendo o

devido acompanhamento durante sua vida útil. Caso este concreto fosse aplicado em campo, visto que não é possível inferir sobre o comportamento futuro do CCR em questão, seria aconselhável a adoção de medidas que viessem a impermeabilizar a estrutura, como a utilização de mantas, e também a instalação de um sistema de drenagem denso e eficaz visando diminuir sensivelmente o fluxo de água pela rocha.

Recomenda-se, também, a realização de monitoramento e acompanhamento da estrutura buscando analisar a impermeabilidade da mesma bem como o eventual surgimento de fissuras e deposição de material esbranquiçado.

Quando se pretende utilizar uma determinada rocha para obtenção de agregados visando a confecção de concreto não basta conhecer a origem desta rocha, é necessária também a realização de investigação aprofundada dos processos geológicos posteriores a que foi submetida. O ideal seria a realização de análise geológica holística da rocha, análise de risco da presença de produtos potencialmente deletérios, sondagens inclinadas passantes pelas fraturas principais do maciço bem como o acompanhamento e realização de ensaios ao longo da exploração da pedreira.

7 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

- Realizar esta mesma pesquisa baseada no módulo de elasticidade do concreto, tendo em vista que os fenômenos patológicos envolvendo reações expansivas podem resultar em resistências iniciais elevadas devido ao preenchimento dos vazios e que ao longo do tempo estas resistências acabam decrescendo consideravelmente.
- Estudar o efeito da presença de sulfetos e sulfatos no concreto convencional dado o potencial deletério evidenciado por esses produtos no concreto;
- Avaliar o efeito da quantidade de sulfatos presente no concreto, verificando a diminuição da resistência para cada idade;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, J. V.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto de Alta Resistência Compactado Com Rolo para Pavimentação. In: **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP** – Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/329, São Paulo, 2003.

ACI 201.2R-92. Guide to durable concrete. American Concrete Institute, Reapproved 1997. p.1-39.

AGUIAR, G. **Estudo de argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção**. 2004. 210 f. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

AGUIAR, G.; SELMO, S. M. S. Estudo de argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção. In: **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP** – Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. **C33** – Standard Specification for Concrete Aggregates. West Conshohocken, PA, USA. 1997.

_____. **C88** – Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. West Conshohocken, PA, USA. 1999.

ANDRIOLO, F. R. **The use of roller compacted concrete**. São Paulo: Oficina de Textos. 1998.

ANDRIOLO, F. R.; KREMPEL, F. R. Barragens em CCR – Especificações técnicas: pontos de interesse, conflito e discussões. In: Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, 2, 1996, Curitiba. **Anais...** p. 9 -17.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991, Versão corrigida: 1999.

_____. **NBR 5739** – Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118** – Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6467** – Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006, Versão corrigida: 2009.

_____. **NBR 7211** – Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7212** – Execução de concreto dosado em central — Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 7218** – Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 7809** – Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006, Versão corrigida: 2008.

_____. **NBR 9917** – Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 12655** – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 15577** – Agregados - Reatividade álcali-agregado. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 15900** – Água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 30** – Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 46** – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 51** – Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR NM 52** – Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 137** – Argamassa e concreto – Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR NM 148** – Agregado - Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 248** – Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. S. A Norma Brasileira de água de amassamento do concreto - uma contribuição para a sustentabilidade. **Concreto e Construções**, Ano XXXVIII, Abril, Maio, Junho 2010 - 58, p. 37 – 45.

BRE Special Digest. **Concrete in aggressive ground**. Part 1-4. London: Construction Research Communications Ltd, 2001.

CASANOVA, I.; AGULLÓ, L.; AGUADO, A. Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – I. Reaction system and rate model. **Cement and Concrete Research**, v.26, n.7, p. 993-998, 1996.

CASANOVA, I.; AGULLÓ, L.; AGUADO, A. Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – II. Physical-chemical modeling of sulphate attack. **Cement and Concrete Research**, v.27, n.11, 1997.

COLLEPARDI, M. A State-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. **Cement and concrete composites**, v. 25, p.401-407, 2003.

COPEL, Companhia Paranaense de Energia. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F86108AB3CF1D4E5F032574120060B8F0>>. Acesso em 05 jul. 2013, às 10:17.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. 2004. 246 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte, 2004.

DAL MOLIN, D. C. C. Técnicas Experimentais para Estudo da Microestrutura. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO (IBRACON). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Ed. G C Isaia, 2007. p. 403-436.

DIAMOND, S. Delayed Ettringite Formation - Process and Problems. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, p. 205-215, 1996.

FAQUINELI, C. R.; CALIXTO, J. M.; FERREIRA, M. C. Avaliação da reatividade de agregados contendo sulfetos em concretos e argamassas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52, 2010, Fortaleza. **Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto**, São Paulo: IBRACON, 2010, p.1-16, 1 CD ROM.

FAQUINELI, C. R. **Estudo da reatividade de agregados contendo sulfetos em concretos e argamassas**. 2010. 89 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FERRARIS, C. F.; CLIFTON, J. F.; STUTZMAN, P. E.; GARBOCZI, E. J.; Mechanisms of degradation of Portland cement-based systems by sulfate attack. In: L. L. SCRIEVENER, J. F. YOUNG. **Mechanisms of Chemical Degradation of cement-based systems**, London: E & FN Spon, p. 185-192, 1997.

FU, Y.; GU, P.; XIE, P.; BEAUDOIN, J. J. A kinetic study of delayed ettringite formation in hydrated Portland cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 63-70, 1995.

GOMIDES, M. J. **Ataque por sulfatos ao concreto compactado com rolo**. 2001. 176 f. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás Goiânia, 2001.

GOMIDES, M. J. **Investigação de agregados contendo sulfetos e seus efeitos sobre a durabilidade do concreto**. 2009. 280 f. Tese (Doutorado), UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

GOMIDES, M. J.; HASPARYK, N. P.; CASAREK, H.; DAL MOLIN, D. C. C. Investigação da influência de agregados contendo sulfetos sobre as propriedades macroestruturais de concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52, 2010, Fortaleza. **Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto**, São Paulo: IBRACON, 2010, p.1-16, 1 CD ROM.

GOMIDES, M. J.; HASPARYK, N. P.; CASAREK, H.; SILVA, H. H. A. B. Análises microestruturais de agregados contendo sulfetos e seus efeitos sobre a durabilidade do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52, 2010, Fortaleza. **Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto**, São Paulo: IBRACON, 2010, p.1-14, 1 CD ROM.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HELENE, P. L. R.; FIGUEIREDO, E. P. **Manual de reabilitação de estruturas de concreto. Reparo, Reforço e Proteção**. São Paulo: Ed. Multipla, 2005.

ICOLD, International Commission on Large Dams. Disponível em: < <http://www.icold-cigb.org/>>. Acesso em 07 jul. 2013, às 14:20.

KAKALI, G.; TSIVILIS, S.; AGGELI, M. B. Hydration products of C_3A , C_3S and Portland cement in the presence of $CaCO_3$. **Cement and Concrete Research**, v.30, p. 1073-1077, 2000.

KFFURI, M. V. A recuperação da barragem do Rio Descoberto. **Recuperar**. São Paulo, Maio/Junho 2003.

KUZEL, H. J. Initial reactions and mechanisms of delayed ettringite formation in Portland cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, p. 195-203, 1996.

LIMA, A. L. C. **Influência da presença de sulfetos na implantação da UHE Irapé – Vale do Jequitinhonha – Minas Gerais**. 2009. 229 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

LINHARES, B. T. **Avaliação do desempenho de cimentos CP II-E e CP II-F com diferentes teores de pozolanas frente ao ataque de íons sulfato**. 2010. 72 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MAIA, J. L. **Uso de resíduos em sistemas cimentícios – Aplicação do método físico-químico para otimização de formulações**. 2008. 260 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MARQUES FILHO, J. **Maciços experimentais de laboratório de Concreto Compactado com Rolo aplicado às barragens**. 2005. 278 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3a. ed., São Paulo: Ibracon, 2008.

MELO, S. K. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. 2010. 286 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

MELO, S. K.; HASPARYK, N. P.; CARASEK, H.; MARTINS, C. Estudo da formação da etringita tardia (DEF) em concreto de cimento Portland pozolânico por calor de hidratação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52, 2010, Fortaleza. **Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto**, São Paulo: IBRACON, 2010, p.1-16, 1 CD ROM.

MINDAT.ORG, Mineralogy database. Disponível em: <<http://www.mindat.org/>>. Acesso em 07 fev. 2013, às 20:32.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**, 2a. Edição, São Paulo: PINI, 1997.

NEVILLE, A. M. The confused world of sulfate attack on concrete. **Cement and Concrete Research**, v.34, p. 1275-1296, 2004.

NEVILLE, A. M. **Concrete. Neville's Insights and Issues**, 1st edition, Thomas Telford Ltd., 2006.

OLIVEIRA, P. J.; SALLES, F. M. Concreto Compactado com Rolo – Características e propriedades. In: Simpósio de Obras em Concreto Compactado com Rolo, 1, 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1995, p. 187-208.

PAVOINE, A.; DIVET, L.; FENOUILLET, S. A concrete performance test for delayed ettringite formation: Part I optimisation. **Cement and Concrete Research**, v.36, p. 2138-2143, 2006.

REGATTIERI, C. E. X.; HELENE, P. R. L. Mecanismos de Transporte de Agentes Agressivos no Concreto. In: **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP** – Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 1999.

SANTHANAM, M.; COHEN, M. D.; OLEK, J. Mechanism of sulfate attack: a fresh look. Part 2. Proposed mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v.33, p. 341-346, 2003.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssilica**. 1994. 151 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SILVA, H. H. A. B.; HASPARYK, N. P.; CASAREK, H. Investigação de concretos de uma usina hidrelétrica após três décadas de sua construção quanto à possibilidade de existência de sulfetos nos agregados e de deterioração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53, 2011, Florianópolis. **Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo: IBRACON, 2011, p. 1-16, 1 CD ROM.

SKALNY, J.; JOHANSEN, V.; THAULOW, N.; PALOMO, A. DEF: As a form of sulfate attack. **Materiales de Construcción**, Vol. 46, nº 244, 26 p., 1996.

SKALNY, J.; MARCHAND, J.; ODLER, I. **Sulfate Attack on Concrete**, Taylor & Francis, London, 2001.

SOUZA, R. B.; JOHN, V. M. Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos: método de ensaio acelerado. In: **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP** – Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2007.

STANTON, T. E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. In: **Proceedings of American Society of Civil Engineers**. v. 66, n. 10. Dec. 1940, p. 1781-1811.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2nd ed. Trowbridge: Thomas Telford, 1997.

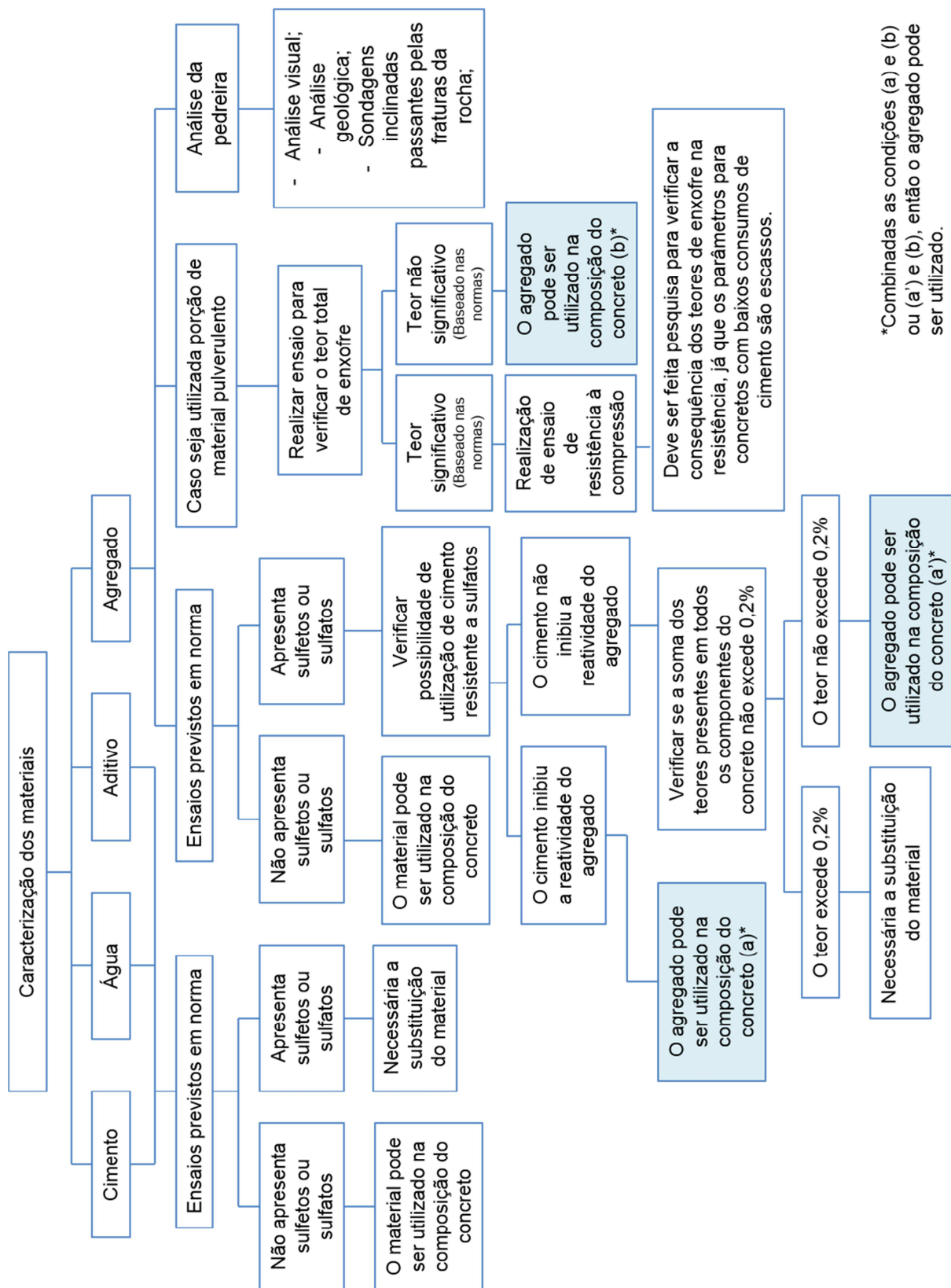
TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K. L. Delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, v.31, p. 683-93, 2001.

TRABOULSI, M. A. **Análise do comportamento de juntas de CCR com alto teor de finos**. 2007. 260 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

WENDLER, A. P. **Estudo experimental do concreto compactado com rolo enriquecido com calda de cimento para face de barragens de concreto**. 2010. 115 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

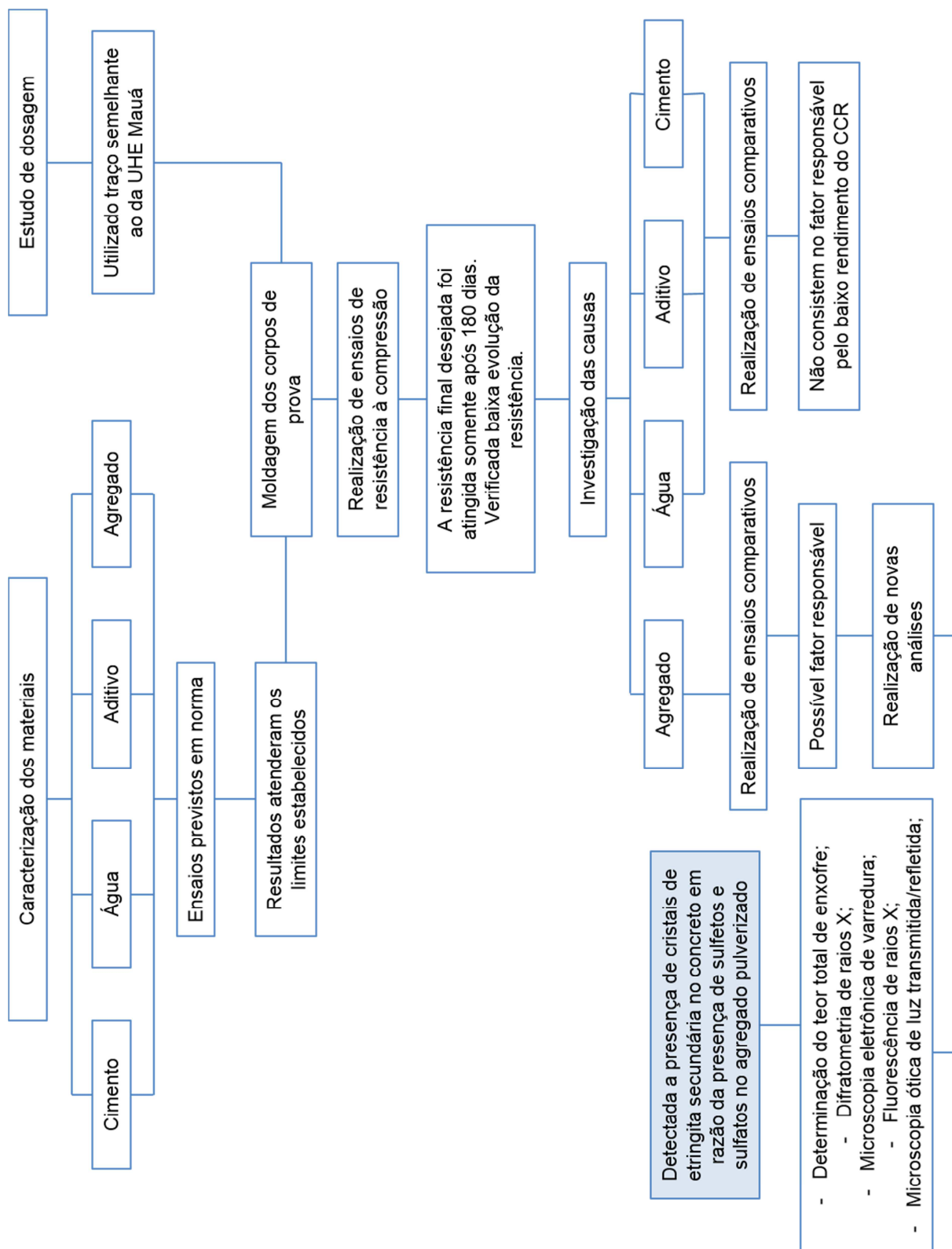
ANEXOS

**ANEXO A – DIRETRIZES PARA A DETECÇÃO DE SULFETOS
E SULFATOS EM CCR**



*Combinadas as condições (a) e (b) ou (a') e (b), então o agregado pode ser utilizado.

ANEXO B – RESUMO DA LOGÍSTICA DO ESTUDO



**ANEXO C – RESULTADOS CCR 01
E CCR 02**

Dosagem			CCR 01				
Lote de amostragem			1 a 30	31 a 60	61 a 90	MÉDIA	TOTAL
Cimento (kg/m³)			80				
Água (kg/m³)			135				
Areia artificial (kg/m³)			1254				
Brita 25 mm (kg/m³)			733				
Brita 50 mm (kg/m³)			489				
Relação a/c (kg/m³)			1,69				
Aditivo plastificante retardador de pega (kg/m³)			0,96				
Diâmetro máximo (mm)			50				
CONCRETO FRESCO	Vebê (s)	Número de amostras	30	30	11	23	71
		Média	17,2	13,3	12,8	14,9	-
		Desvio Padrão	3,8	2,5	-	4,0	-
	Massa unitária (kg/m³)	Número de amostras	30	30	11	23	71
		Média	2625	2625	2606	2622	-
		Desvio Padrão	44	41	-	40	-
CONCRETO ENDURECIDO	Resistência à compressão (MPa)	7 dias	3,7	3,5	3,6	3,6	-
		28 dias	4,5	4,3	4,3	4,4	-
		90 dias	5,9	5,5	5,7	5,7	-
		180 dias	7,7	7,0	6,8	7,3	-
		360 dias	8,9	8,1	8,2	8,4	-
	Número de amostras	7 dias	30	30	11	23	71
		28 dias	30	30	11	23	71
		90 dias	30	30	11	23	71
		180 dias	30	30	11	23	71
		360 dias	23	30	11	21	64
	Coeficiente de variação (%)	7 dias	15,1	16,6	-	16,0	-
		28 dias	17,1	15,6	-	16,4	-
		90 dias	18,3	15,3	-	17,2	-
		180 dias	17,9	17,6	-	18,8	-
		360 dias	22,8	19,8	-	21,1	-
	Rendimento (MPa/kgf/m³)	7 dias	0,046	0,044	0,045	0,045	-
		28 dias	0,057	0,054	0,054	0,055	-
		90 dias	0,074	0,069	0,072	0,071	-
		180 dias	0,097	0,088	0,086	0,091	-
		360 dias	0,111	0,101	0,103	0,105	-
	Evolução da resistência (%)	De 7 para 28 dias	23	23	20	23	-
		De 28 para 90 dias	30	27	34	30	-
		De 90 para 180 dias	30	28	19	28	-
		De 180 para 360 dias	15	16	20	15	-
Coeficiente "t" Student			0,842	0,842	0,842	0,842	-
fck na idade de 180 dias (MPa)			6,6	6,0	5,6	6,1	-
Coeficiente var. (teórico para N < 15 amostras)			17,9%	17,6%	21,3%	18,8%	-
fck na idade de 180 dias (MPa)			7,2	6,8	7	6,9	-
Coeficiente var. (teórico para N < 15 amostras)			22,8%	19,8%	18,0%	21,1%	-

Dosagem			CCR 02				
Lote de amostragem			1 a 30	31 a 60	61 a 90	91 a 120	121 a 150
Cimento (kg/m³)			85				
Água (kg/m³)			125				
Areia artificial (kg/m³)			1271				
Brita 25 mm (kg/m³)			614				
Brita 50 mm (kg/m³)			614				
Relação a/c (kg/m³)			1,47				
Aditivo plastificante retardador de pega (kg/m³)			1,02				
Diâmetro máximo (mm)			50				
CONCRETO FRESCO	Vebê (s)	Número de amostras	30	30	30	30	30
		Média	12,9	12,5	12,9	13,6	13,0
		Desvio Padrão	2,1	1,8	1,5	1,6	1,4
	Massa unitária (kg/m³)	Número de amostras	30	30	30	30	30
		Média	2679	2679	2680	2684	2683
		Desvio Padrão	20	24	19	17	19
CONCRETO ENDURECIDO	Resistência à compressão (MPa)	7 dias	3,4	3,8	3,8	4,0	3,6
		28 dias	4,2	4,5	4,6	4,8	4,2
		90 dias	5,3	5,6	5,2	5,7	5,4
		180 dias	6,3	6,7	6,9	7,1	6,8
		360 dias	8,1	8,8	9,0	9,6	9,0
	Número de amostras	7 dias	30	30	30	30	30
		28 dias	30	30	30	30	30
		90 dias	30	30	30	30	30
		180 dias	30	30	30	30	30
		360 dias	16	21	17	17	17
	Coeficiente de variação (%)	7 dias	9,4	13,2	11,4	18,1	20,0
		28 dias	9,2	12,6	15,6	16,9	20,7
		90 dias	7,6	10,9	15,2	16,5	19,0
		180 dias	10,0	13,0	15,6	18,2	22,2
		360 dias	13,6	13,9	21,2	18,9	19,7
	Rendimento (MPa/kgf/m³)	7 dias	0,040	0,045	0,045	0,047	0,042
		28 dias	0,049	0,053	0,054	0,056	0,050
		90 dias	0,062	0,066	0,062	0,067	0,064
		180 dias	0,075	0,079	0,082	0,084	0,080
		360 dias	0,095	0,104	0,106	0,113	0,106
	Evolução da resistência (%)	De 7 para 28 dias	22	18	20	20	17
		De 28 para 90 dias	27	24	13	19	28
		De 90 para 180 dias	20	20	33	26	27
		De 180 para 360 dias	28	31	30	35	32
Coeficiente "t" Student			0,842	0,842	0,842	0,842	0,842
fck na idade de 180 dias (MPa)			5,8	6,0	6,0	6,2	5,6
Coeficiente var. (teórico para N < 15 amostras)			10,0%	13,0%	15,6%	16,0%	22,2%
fck na idade de 180 dias (MPa)			7,2	7,8	7,4	8,1	7,5
Coeficiente var. (teórico para N < 15 amostras)			13,6%	13,9%	21,2%	18,9%	19,7%

Dosagem			CCR 02				
Lote de amostragem			151 a 180	181 a 210	211 a 240	241 a 270	271 a 300
Cimento (kg/m³)			85				
Água (kg/m³)			125				
Areia artificial (kg/m³)			1271				
Brita 25 mm (kg/m³)			614				
Brita 50 mm (kg/m³)			614				
Relação a/c (kg/m³)			1,47				
Aditivo plastificante retardador de pega (kg/m³)			1,02				
Diâmetro máximo (mm)			50				
CONCRETO FRESCO	Vebê (s)	Número de amostras	29	30	30	30	30
		Média	13,4	12,6	12,2	12,8	14,4
		Desvio Padrão	1,4	1,4	2,0	1,5	1,4
	Massa unitária (kg/m³)	Número de amostras	29	30	30	30	30
		Média	2684	2683	2676	2684	2686
		Desvio Padrão	23	19	27	14	15
CONCRETO ENDURECIDO	Resistência à compressão (MPa)	7 dias	3,6	3,4	3,5	3,6	4,0
		28 dias	4,4	4,2	4,5	4,6	5,0
		90 dias	5,6	6,1	6,2	6,4	6,8
		180 dias	7,1	7,5	8,0	8,4	9,5
		360 dias	9,5	9,9	10,0	11,1	12,8
	Número de amostras	7 dias	30	30	30	30	30
		28 dias	30	30	30	30	30
		90 dias	30	30	30	30	30
		180 dias	30	30	30	30	30
		360 dias	18	17	17	18	19
	Coeficiente de variação (%)	7 dias	20,1	15,5	19,8	13,8	13,6
		28 dias	16,3	19,5	22,5	19,0	16,7
		90 dias	17,6	17,8	17,5	13,9	11,4
		180 dias	14,3	20,7	17,9	15,2	13,5
		360 dias	15,6	25,4	20,6	17,5	15,2
	Rendimento (MPa/kgf/m³)	7 dias	0,042	0,040	0,042	0,042	0,047
		28 dias	0,052	0,049	0,052	0,054	0,059
		90 dias	0,066	0,071	0,073	0,075	0,080
		180 dias	0,084	0,089	0,094	0,099	0,112
		360 dias	0,111	0,116	0,118	0,130	0,151
	Evolução da resistência (%)	De 7 para 28 dias	23	22	25	27	26
		De 28 para 90 dias	26	45	40	40	35
		De 90 para 180 dias	28	25	27	33	40
		De 180 para 360 dias	33	31	26	31	35
Coeficiente "t" Student			0,842	0,842	0,842	0,842	0,842
fck na idade de 180 dias (MPa)			6,3	6,2	6,8	7,4	8,4
Coeficiente var. (teórico para N < 15 amostras)			14,3%	20,7%	17,9%	15,2%	13,5%
fck na idade de 180 dias (MPa)			8,2	7,8	8,3	9,4	11,2
Coeficiente var. (teórico para N < 15 amostras)			15,6%	25,4%	20,6%	17,5%	15,2%

Dosagem			CCR 02				
Lote de amostragem			301 a 330	331 a 360	361 a 390	391 a 420	421 a 450
Cimento (kg/m³)			85				
Água (kg/m³)			125				
Areia artificial (kg/m³)			1271				
Brita 25 mm (kg/m³)			614				
Brita 50 mm (kg/m³)			614				
Relação a/c (kg/m³)			1,47				
Aditivo plastificante retardador de pega (kg/m³)			1,02				
Diâmetro máximo (mm)			50				
CONCRETO FRESCO	Vebê (s)	Número de amostras	30	30	30	30	30
		Média	14,5	14,3	14,8	13,8	13,6
		Desvio Padrão	1,0	1,0	0,9	2,8	0,8
	Massa unitária (kg/m³)	Número de amostras	30	30	30	30	30
		Média	2695	2692	2695	2696	2701
		Desvio Padrão	14	11	10	14	10
CONCRETO ENDURECIDO	Resistência à compressão (MPa)	7 dias	4,3	3,8	4,5	4,4	4,5
		28 dias	5,6	4,8	5,6	5,6	5,7
		90 dias	7,3	6,7	7,5	7,7	8,0
		180 dias	9,8	8,3	10,0	10,5	11,3
		360 dias	12,7	9,8	-	-	-
	Número de amostras	7 dias	29	30	30	29	30
		28 dias	29	30	30	29	30
		90 dias	29	30	30	29	30
		180 dias	29	30	30	29	30
		360 dias	16	12	-	-	-
	Coeficiente de variação (%)	7 dias	23,5	18,0	17,7	23,1	19,0
		28 dias	30,8	17,0	19,1	23,0	36,6
		90 dias	25,3	19,3	20,1	22,3	18,7
		180 dias	27,5	14,2	22,4	24,0	17,8
		360 dias	30,4	-	-	-	-
	Rendimento (MPa/kgf/m³)	7 dias	0,050	0,045	0,053	0,052	0,053
		28 dias	0,066	0,057	0,066	0,065	0,068
		90 dias	0,086	0,078	0,088	0,090	0,095
		180 dias	0,115	0,098	0,117	0,124	0,133
		360 dias	0,150	0,116	-	-	-
	Evolução da resistência (%)	De 7 para 28 dias	31	26	25	26	28
		De 28 para 90 dias	31	38	34	38	40
		De 90 para 180 dias	33	24	33	37	41
		De 180 para 360 dias	31	19	-	-	-
Coeficiente "t" Student			0,842	0,842	0,842	0,842	0,842
fck na idade de 180 dias (MPa)			7,5	7,3	8,1	8,4	9,6
Coeficiente var. (teórico para N < 15 amostras)			27,5%	14,2%	22,4%	24,0%	17,8%
fck na idade de 180 dias (MPa)			9,5	8,2	-	-	-
Coeficiente var. (teórico para N < 15 amostras)			30,4%	20,0%	-	-	-

Dosagem			CCR 02				
Lote de amostragem			451 a 480	481 a 510	511 a 540	541 a 570	571 a 600
Cimento (kg/m³)			85				
Água (kg/m³)			125				
Areia artificial (kg/m³)			1271				
Brita 25 mm (kg/m³)			614				
Brita 50 mm (kg/m³)			614				
Relação a/c (kg/m³)			1,47				
Aditivo plastificante retardador de pega (kg/m³)			1,02				
Diâmetro máximo (mm)			50				
CONCRETO FRESCO	Vebê (s)	Número de amostras	29	30	29	30	30
		Média	14,2	12,8	14,0	14,1	14,0
		Desvio Padrão	0,8	3,6	1,2	1,1	1,1
	Massa unitária (kg/m³)	Número de amostras	29	28	29	30	30
		Média	2701	2700	2698	2695	2698
		Desvio Padrão	10	7	10	10	6
CONCRETO ENDURECIDO	Resistência à compressão (MPa)	7 dias	4,0	3,8	3,8	4,0	3,8
		28 dias	4,9	4,9	4,6	4,8	4,3
		90 dias	7,1	7,3	7,3	7,2	6,8
		180 dias	10,0	10,3	9,9	9,8	9,1
		360 dias	-	-	-	-	-
	Número de amostras	7 dias	29	29	29	30	30
		28 dias	29	29	29	30	30
		90 dias	29	29	29	30	30
		180 dias	29	29	29	29	30
		360 dias	-	-	-	-	-
	Coeficiente de variação (%)	7 dias	16,2	15,0	16,5	17,9	15,6
		28 dias	16,8	14,4	14,4	18,3	13,0
		90 dias	14,3	14,3	15,0	17,2	13,7
		180 dias	15,3	14,7	16,1	18,6	14,7
		360 dias	-	-	-	-	-
	Rendimento (MPa/kgf/m³)	7 dias	0,047	0,045	0,044	0,048	0,044
		28 dias	0,058	0,057	0,055	0,056	0,051
		90 dias	0,084	0,086	0,085	0,085	0,080
		180 dias	0,117	0,121	0,117	0,115	0,106
		360 dias	-	-	-	-	-
	Evolução da resistência (%)	De 7 para 28 dias	23	27	23	19	16
		De 28 para 90 dias	44	50	56	50	56
		De 90 para 180 dias	40	41	37	36	34
		De 180 para 360 dias	-	-	-	-	-
Coeficiente "t" Student			0,842	0,842	0,842	0,842	0,842
fck na idade de 180 dias (MPa)			8,7	9,0	8,6	8,3	7,9
Coeficiente var. (teórico para N < 15 amostras)			15,3%	14,7%	16,1%	18,6%	14,7%
fck na idade de 180 dias (MPa)			-	-	-	-	-
Coeficiente var. (teórico para N < 15 amostras)			-	-	-	-	-

Dosagem			CCR 02					
Lote de amostragem			601 a 630	631 a 660	661 a 690	691 a 720	MÉDIA	TOTAL
Cimento (kg/m³)			85					
Água (kg/m³)			125					
Areia artificial (kg/m³)			1271					
Brita 25 mm (kg/m³)			614					
Brita 50 mm (kg/m³)			614					
Relação a/c (kg/m³)			1,47					
Aditivo plastificante retardador de pega (kg/m³)			1,02					
Diâmetro máximo (mm)			50					
CONCRETO FRESCO	Vebê (s)	Número de amostras	30	30	30	6	28	693
		Média	14,2	13,5	13,9	14,8	13,6	-
		Desvio Padrão	1,0	0,9	0,9	-	1,7	-
	Massa unitária (kg/m³)	Número de amostras	30	30	30	6	28	691
		Média	2700,0	2700	2692	2697	2691	-
		Desvio Padrão	9	15	10	-	17	-
CONCRETO ENDURECIDO	Resistência à compressão (MPa)	7 dias	4,0	4,9	4,3	4,5	4,0	-
		28 dias	5,0	6,2	5,3	5,5	4,9	-
		90 dias	7,9	9,2	7,5	7,3	6,8	-
		180 dias	10,4	11,8	8,2	-	8,9	-
		360 dias	-	-	-	-	10,0	-
	Número de amostras	7 dias	30	30	30	6	28	691
		28 dias	30	30	30	6	28	691
		90 dias	30	30	30	6	28	691
		180 dias	30	30	1	-	28	655
		360 dias	-	-	-	-	17	205
	Coeficiente de variação (%)	7 dias	14,7	22,1	16,1	-	19,8	-
		28 dias	17,4	21,6	16,8	-	22,9	-
		90 dias	17,7	17,9	16,6	-	22,7	-
		180 dias	20,1	17,9	-	-	25,6	-
		360 dias	-	-	-	-	24,5	-
	Rendimento (MPa/kgf/m³)	7 dias	0,046	0,058	0,050	0,053	0,047	-
		28 dias	0,059	0,073	0,063	0,065	0,058	-
		90 dias	0,093	0,108	0,088	0,086	0,080	-
		180 dias	0,123	0,138	0,097	-	0,104	-
		360 dias	-	-	-	-	0,118	-
	Evolução da resistência (%)	De 7 para 28 dias	28	25	26	22	24	-
		De 28 para 90 dias	57	48	40	31	38	-
		De 90 para 180 dias	32	28	10	-	31	-
		De 180 para 360 dias	-	-	-	-	13	-
Coeficiente "t" Student			0,842	0,842	0,842	0,842	0,842	-
fck na idade de 180 dias (MPa)			8,7	10,0	6,8	-	7,0	-
Coeficiente var. (teórico para N < 15 amostras)			20,1%	17,9%	20,0%	20,0%	25,6%	-
fck na idade de 180 dias (MPa)			-	-	-	-	-	-
Coeficiente var. (teórico para N < 15 amostras)			-	-	-	-	-	-